

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Estudo da distribuição espacial hemisférica da radiação difusa ao longo do dia

Telmo Fernando Marcos Batalha

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e Ambiente

Dissertação orientada por:
João Manuel de Almeida Serra

2018

Resumo

Um bom conhecimento da distribuição espacial da radiação solar contribui para um bom aproveitamento da sua energia. A radiação solar é composta por duas componentes: a radiação direta, que é a radiação que vem diretamente do sol sem sofrer qualquer desvio ou absorção e por isso com mais irradiância. E a radiação difusa, que é o resultado de inúmeras reflexões e dispersões da radiação solar em moléculas, partículas ou nuvens presentes na atmosfera e por isso com menos intensidade.

Dependendo das condições climáticas, a radiação difusa pode apresentar valores bastante significativos. Com base nesta ideia, esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de medida que permite estudar a distribuição espacial hemisférica da radiação difusa ao longo de um dia. A este sistema foi integrado um microcomputador Raspberry Pi, que está programado para fazer girar três piranômetros SPN1 da Delta-T Devices com diferentes inclinações ao longo de 360°. Durante a rotação, o sistema de medida mede e armazena os dados de radiação total e difusa obtidos pelos piranômetros para posteriormente serem tratados. Através destes dados é possível avaliar a distribuição da radiação solar difusa proveniente de todo o hemisfério e perceber como os obstáculos nas redondezas e as condições climáticas afetam os resultados.

Apesar do sistema apresentar algumas limitações em termos de medição de radiação difusa, especialmente em dias de céu limpo quando existe presença de radiação difusa circumsolar, os resultados obtidos indicam que o sistema está apto a medir radiação global e difusa com uma boa precisão se comparados com um sistema de medida baseado num seguidor solar, apresentando uma correlação linear de 99% e 79% para a radiação global e difusa, respetivamente.

Palavras-Chave: Distribuição espacial da radiação difusa, radiação difusa circumsolar, sistema de medida.

Abstract

A good knowledge of the spatial distribution of the solar radiation play an important role in the global energy harnessing. The solar radiation is composed of two components: the direct radiation, which is the radiation that comes directly from the sun without suffering any deviation or absorption and therefore with more irradiance. And the diffuse radiation, which is the result of countless reflections and dispersions of the solar radiation in molecules, particles or clouds present in the atmosphere and therefore with less intensity.

Depending on the climatic conditions, the diffuse radiation can reveal very significant values. Focusing on this idea, the main goal of this MSc dissertation aims to develop a measurement system that allows to study the hemispheric spatial distribution of diffuse radiation over the course of a day. In this system, it was integrated a microcomputer Raspberry Pi that is programmed to spin three SPN1 pyranometers from Delta-T Devices with different tilts, all over 360°. While rotating, the system measures and saves the global and diffuse radiation data to be treated later. Through this data, the distribution of the diffuse radiation coming from the hemisphere can be assessed. It is also possible to understand how the obstacles in the surroundings and the climatic conditions affect the results.

Although the system presents some limitations in terms of measurement of diffuse radiation, especially in days of clear skies when there is presence of diffuse circumsolar radiation, the obtained results indicate that the system is able to measure global and diffuse radiation with a

good precision if compared with a measuring system based on a solar tracker, presenting a linear correlation of 99% and 79% for the global and diffuse radiation, respectively.

Keywords: Spatial distribution of diffuse radiation, diffuse circumsolar radiation, measuring system.

Índice

Resumo.....	ii
Abstract	ii
Índice de Figuras	5
Índice de Tabelas.....	6
Agradecimentos.....	7
Simbologia e Notações	8
Capítulo 1 – Introdução.....	9
Capítulo 2 – Estado da arte.....	12
2.1. Instrumentos de medição de radiação solar.....	12
2.2. Sistemas existentes de medição da radiação difusa.....	14
2.3. Piranómetro SPN1	15
2.4. Medição da distribuição angular da radiação difusa	17
Capítulo 3 – Metodologia.....	18
3.1. Apresentação do sistema	18
3.2. Configuração do motor.....	20
3.3. Comunicação com os piranómetros.....	21
Capítulo 4 – Caracterização da área de estudo	23
Capítulo 5 – Resultados.....	25
5.1. Validação do sistema.....	25
5.2. Verificação com os piranómetros	30
5.3. Execução prática.....	34
Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimentos futuros	44
Referências Bibliográficas	46
Anexos.....	I

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Representação de todas as componentes da radiação difusa [11].....	10
Figura 2.1 – a) Piranómetro da Kipp & Zonen; [14] b) Pireliómetro da Huskeflux; [15]	13
Figura 2.2 – Exemplo de uma termopilha da TE Connectivity [18]	13
Figura 2.3 - Princípio de funcionamento de uma termopilha [17]	13
Figura 2.4 - Sistemas de medida que permitem calcular a DHI: a) Anel estático de Drummund; [21] b) RSR, Radiómetro com faixa de sombreamento rotativa; [22] c) Seguidor solar SOLYS2; [23]	15
Figura 2.5 – a) Piranómetro SPN1 utilizado nesta dissertação; b) <i>Shadow Mask</i> ; c) Vista de cima do SPN1 com a numeração das termopilhas	16
Figura 3.1 - Componentes eletrónicos do sistema: 1. Fonte de alimentação; 2. Motor de passos; 3. <i>Switch</i> ; 4. <i>Shield</i> ; 5. <i>Raspberry Pi</i>	18
Figura 3.2 - Apresentação do sistema de medida.	19
Figura 3.3 - Interior da caixa protectora com os componentes eletrónicos montados.	19
Figura 3.4 - Fluxograma simplificado dos inputs e outputs da <i>shield</i>	20
Figura 3.5 - Fluxograma dos passos que o sistema faz desde os piranómetros até ao utilizador	22
Figura 4.1 - Imagem aérea retirada do Google Earth que demonstra o local das medições e os obstáculos nas redondezas (fonte: Google Earth).	23
Figura 4.2 - Sistema de medida em funcionamento de manhã, alinhado com a parede a Sul.....	24
Figura 4.3 - Representação em Matlab da variação da altura solar ao longo do dia 25/10/2017	24
Figura 4.4 - Representação do impacto da parede a Sul no campo de visão do sistema de medida	25
Figura 5.1 - Esquema da primeira experiência em que são feitas medidas simultâneas usando a programa do fabricante e usando o sistema desenvolvido.....	26
Figura 5.2 - Comparação entre os dados obtidos pelo sistema de medida e o programa do fabricante (SunRead) ao longo do dia	26
Figura 5.3 – Comparação entre os dados obtidos pelo programa SunRead e os dados obtidos pelo sistema de medida	27
Figura 5.4 - Comparação entre os dados de GHI obtidos pelo sistema e pelo Campus Solar.....	28
Figura 5.5 - Comparação entre os dados de DHI obtidos pelo sistema e pelo Campus Solar.....	28
Figura 5.6 - Regressão linear entre a GHI obtida pelo Campus e a GHI obtida pelo sistema de medida	29
Figura 5.7 - Regressão linear entre a DHI obtida pelo Campus e a DHI obtida pelo sistema de medida	29
Figura 5.8 – Esquema da segunda experiência onde o sistema está parado a receber dados durante um dia	30
Figura 5.9 - Resultados obtidos de GHI pela segunda experiência.....	30
Figura 5.10 - Resultados obtidos de DHI pela segunda experiência.....	31
Figura 5.11 - Variação do ângulo de incidência para um plano orientado a S e a SSE com inclinação 45°	32
Figura 5.12 - Variação do azimute do sol ao longo do dia da segunda experiência. Este azimute tem como ponto de origem o Sul geográfico, ao contrário do habitual Norte geográfico.	33
Figura 5.13 – Representação do impacto que a parede a SSE tem durante a manhã em relação ao azimute solar (Ψ)......	33
Figura 5.14 – Esquema da terceira experiência onde o sistema de medida roda 360° para medir a radiação em todas as direções	34
Figura 5.15 - Representação do sistema a começar a medir no ponto inicial e os ângulos dos dados correspondentes aos pontos cardeais	35
Figura 5.16 - Dados de radiação total e radiação difusa obtidos pelo sistema de medida quando orientado a Sul.....	35
Figura 5.17 -Dados de radiação total e radiação difusa obtidos pelo sistema de medida quando orientado a Oeste.	36
Figura 5.18 - Dados de radiação total e radiação difusa obtidos pelo sistema de medida quando orientado a Norte.	36

Figura 5.19 - Dados de radiação total e radiação difusa obtidos pelo sistema de medida quando orientado a Este.	37
Figura 5.20 - Variação do cosseno do ângulo de incidência para os quatro pontos cardeais: a) Sul b) Oeste c) Norte e d) Este.	39
Figura 5.21 – Gráficos de radar de radiação global e difusa das três inclinações do sistema de medida em W/m^2 : a) GHI $\beta = 0^\circ$ b) DHI $\beta = 0^\circ$ c) GHI $\beta = 45^\circ$ d) DHI $\beta = 45^\circ$ e) GHI $\beta = 90^\circ$ f) DHI $\beta = 90^\circ$	40
Figura 5.22 – Distribuição de DHI por direção em relação à DHI obtida na horizontal às 10:02h	42
Figura 5.23 - Distribuição de DHI por direção em relação à DHI obtida na horizontal à 13:20h...	43
Figura 5.24 - Distribuição de DHI por direção em relação à DHI obtida na horizontal às 17:02h.	43

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Especificações técnicas do motor de passos.....	20
---	----

Agradecimentos

Quero agradecer em primeiro lugar ao meu orientador, Professor João Serra, que apesar de ser bastante ocupado e ter muitas preocupações, disponibilizou o seu tempo e sabedoria ao longo deste projeto. Agradeço ao Ivo Bernardo, que sem ele este projeto não teria sido possível. E ao Professor Miguel Brito por todas as dicas que deu de maneira a tornar este projeto mais interessante.

Agradeço também à minha namorada Patrícia Manteiga, pelo tempo e pelas dicas que me deu no word. Aos meus amigos que sempre tiveram presentes nesta luta: Nuno Lourenço, Pedro Teles Santos e Mónica Coelho.

Quero também deixar uma palavra de apreço ao Rodrigo Silva por ter disponibilizado o seu tempo de maneira a tornar este projeto mais científico.

Simbologia e Notações

α	Altura Solar (°)
β	Inclinação (°)
λ	Comprimento de onda (nm)
D	Diâmetro (m)
ψ	Ângulo Azimutal (°)
θ_i	Ângulo de Incidência (°)
θ_z	Ângulo Zenital (°)
ω	Ângulo horário Solar (°)
AM	Massa de ar (<i>Air Mass</i>)
BNI	Irradiância direta incidente num plano perpendicular à radiação (<i>Beam Normal Irradiance</i>)
BHI	Irradiância direta incidente no plano horizontal (<i>Beam Horizontal Irradiance</i>)
BTI	Irradiância direta incidente no plano inclinado (<i>Beam Tilted Irradiance</i>)
CSI	Irradiância difusa circumsolar (<i>Circumsolar Irradiance</i>)
DHI	Irradiância difusa incidente no plano horizontal (<i>Diffuse Horizontal Irradiance</i>)
DTI	Irradiância difusa incidente no plano inclinado (<i>Diffuse Tilted Irradiance</i>)
GHI	Irradiância global incidente no plano horizontal (<i>Global Horizontal Irradiance</i>)
GTI	Irradiância global incidente no plano inclinado (<i>Global Tilted Irradiance</i>)
HB	Brilho Horizontal (Horizontal Brightening)
IDI	Irradiância Difusa Isotrópica (<i>Isotropic Diffuse Irradiance</i>)
ISO	Organização Internacional de Normalização (<i>International Organization for Standardization</i>)
LED	Diodo emissor de luz (<i>Light Emmiting Diode</i>)
RTC	Relógio de tempo real sob a forma de circuito integrado (<i>Real Time Clock</i>)
WMO	Organização Meteorológica Mundial (<i>World Meteorological Organization</i>)

Capítulo 1 – Introdução

O bom uso da energia solar pode mudar o panorama energético nos próximos anos. Com o contínuo crescimento populacional e com uma procura de energia cada vez mais acentuada, é preciso apostar em fontes de energia que garantam a subsistência da humanidade de modo a não prejudicar o planeta onde vivemos. A energia solar é uma forte alternativa ao uso de fontes de energia convencional visto que todos os dias recebemos do sol 1500 vezes a mesma energia que consumimos. [1] Porém, a variabilidade deste recurso torna mais difícil a sua adoção no sentido de poder substituir as energias fósseis a curto prazo e é por isso importante perceber como se comporta e distribui ao longo de toda a cúpula celeste.

A radiação solar é composta por duas componentes: a radiação direta, que é a radiação que vem diretamente do sol sem sofrer qualquer desvio ou absorção e por isso com mais irradiância. E a radiação difusa, que é o resultado de inúmeras reflexões e dispersões da radiação solar em moléculas, partículas ou nuvens presentes na atmosfera e por isso com menos intensidade. [2]

Apesar de ser de maior importância a presença de radiação direta para aproveitamento de energia solar, a radiação difusa pode ainda assim apresentar valores bastante significativos, dependendo das condições climáticas, do tipo de nuvens presentes no céu ou da densidade de partículas no ar. Este tipo de radiação pode ser considerada isotrópica, onde a radiação se dispersa com a mesma intensidade em todas as direções, ou anisotrópica, que varia com a direção.

A diferença entre estes tipos de radiação difusa deve-se principalmente a dois tipos de dispersão que ocorrem na atmosfera: dispersão de Rayleigh e a dispersão de Mie, que acontecem dependendo do tamanho e da forma das partículas que a luz encontra na sua passagem. [3]

A dispersão de Rayleigh é a dispersão da radiação por partículas que são muito menores que o comprimento de onda da radiação ($\lambda \gg D$, átomos ou moléculas). Isto significa que a radiação com menor comprimento de onda vai sofrer maior dispersão do que radiação com maior comprimento de onda, que é o caso da luz azul que origina a cor do céu quando o sol está mais alto. Esta dispersão espalha-se praticamente com igual intensidade em todas as direções na atmosfera.

A dispersão de Mie é a dispersão da radiação por partículas com diâmetros semelhantes ao comprimento de onda da radiação ($\lambda \sim D$, gotas de água, cristais de gelo ou aerossóis) e o seu efeito é tanto maior, quanto maior o tamanho da partícula. Ao contrário da dispersão de Rayleigh, a dispersão de Mie tem a direção e sentido do raio incidente e não depende fortemente do comprimento de onda da radiação, produzindo um brilho branco nos redores do disco solar. [4]

Este efeito é especialmente interessante quando falamos em instrumentos de medida de radiação direta, conhecidos por pireliómetros. Estes aparelhos à medida que acompanham o movimento do sol, captam uma boa parte deste brilho nas suas medições, afetando os valores de radiação direta. Este brilho quando incide numa superfície pode ser referido por irradiação difusa circunsolar (*Circumsolar Diffuse Irradiance*, CSI). É também observável na presença de nuvens finas a alta altitude (cirros) e a variação e caracterização deste tipo de radiação depende da localização geográfica, clima, estação do ano e hora do dia. [5]

Na ausência de aerossóis e outras partículas, o céu vai estar limpo e a radiação irá apenas incidir em átomos e moléculas do ar, predominando a dispersão de Rayleigh e originando assim irradiância difusa isotrópica incidente numa superfície por todo o hemisfério (*Isotropic Diffuse Irradiance*, IDI). Em condições de céu nublado, este tipo de radiação também será dominante. [6]

Outra componente associada à radiação difusa é o brilho horizontal (*Horizon Brightening*, HB) que é independente do azimute. É resultante da radiação incidente percorrer uma maior massa de ar (*Air Mass*, AM), devido a uma maior trajetória percorrida na atmosfera quando o sol está próximo do horizonte. [7]

Muitos foram os modelos teóricos criados para modelar a radiação difusa, tal como Liu e Jordan [8] que consideravam a radiação difusa como sendo isotrópica e a duas dimensões. Hay [9] que já considerava um *background* isotrópico e a componente circumsolar. Ou Temps e Coulson [10] que foram os primeiros a introduzir o brilho horizontal nos cálculos de radiação difusa.

Um dos modelos de transposição de radiação incidente de um plano horizontal para um plano inclinado com resultados mais fiáveis foi o modelo de Perez [11] (figura 1.1), que impõe que a irradiância difusa incidente num plano inclinado (*Diffuse Tilted Irradiance*, DTI) pode ser dividida em três componentes:

$$DTI = CSI + IDI + HB \quad (1)$$

onde,

CSI (*Circumsolar Irradiance*) é a componente circumsolar da radiação difusa incidente num plano inclinado

IDI (*Isotropic Diffuse Irradiance*) é a componente isotrópica da radiação difusa incidente num plano inclinado

HB (*Horizon Brightening*) é o brilho horizontal incidente num plano inclinado

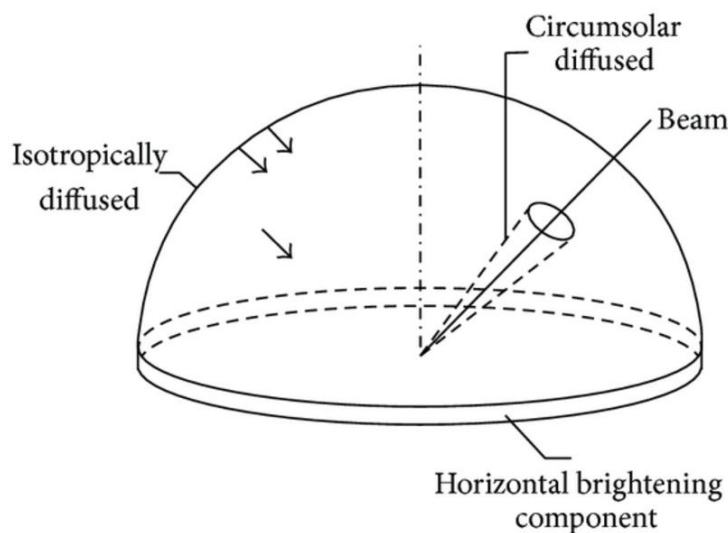


Figura 1.1 - Representação de todas as componentes da radiação difusa [11].

Existe outra fração de radiação solar que não vem diretamente do sol (para além da radiação difusa), que pode incidir num instrumento de medida inclinado. A radiação refletida por superfícies ou pelo solo tem um papel importante no que toca a superfícies inclinadas, dependendo da refletividade e da natureza (isotrópica ou anisotrópica) destes objetos. [12]

A irradiação total incidente para um plano inclinado (*Global Tilted Irradiance*, GTI) pode então ser genericamente expressa:

$$GTI = GRI + BTI + DTI \quad (2)$$

$$GTI = F_R GHI + F_B BHI + F_D DHI$$

onde,

GRI (*Ground Reflected Irradiance*) é a irradiância refletida pelo chão incidente num plano inclinado

BTI (*Beam Tilted Irradiance*) é a irradiância direta incidente num plano inclinado

DTI (*Diffuse Tilted Irradiance*) é a irradiância difusa incidente num plano inclinado

GHI (*Global Horizontal Irradiance*) é a irradiância global incidente num plano horizontal

BHI (*Beam Horizontal Irradiance*) é a irradiância direta incidente num plano horizontal

DHI (*Diffuse Horizontal Irradiance*) é a irradiância difusa incidente num plano horizontal

F_R , F_B e F_D são fatores de transposição de um plano horizontal para um plano inclinado da radiação refletida, direta e difusa respetivamente e não vão ser abordados na presente dissertação.

A presente dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de medida baseado em Raspberry Pi que permite o estudo da DHI proveniente de toda a cúpula celeste. Algumas das componentes da radiação difusa são difíceis de ser observadas, como é o caso do brilho horizontal e da radiação refletida no solo. Por consequente, procurou-se dar primazia à radiação difusa isotrópica e à radiação difusa circumsolar.

No capítulo 2 serão apresentados instrumentos e sistemas de medida utilizados para medir radiação solar e de seguida apresentado o sensor utilizado nesta dissertação, SPN1 da Delta-T Devices. No capítulo 3, apresenta-se o sistema desenvolvido nesta dissertação e a sua construção. O capítulo 4 aborda as condições e obstáculos do local de medida. No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos pelo sistema de medida e finalmente no capítulo 6 apresenta-se uma breve conclusão.

Capítulo 2 – Estado da arte

Desde o início do século XX que começaram a aparecer os primeiros aparelhos científicos para medir irradiância incidente num plano. Desde aí, muito se tem desenvolvido de maneira a serem modernizados para melhor contribuírem para o estudo da radiação solar.

Neste capítulo serão abordados alguns aparelhos para medir a radiação solar, combinações que podem ser feitas para separar as suas componentes e alguns sistemas de medida desenvolvidos para estudar apenas a radiação difusa.

2.1. Instrumentos de medição de radiação solar

A elevada complexidade da radiação solar sempre foi objeto de estudo entre a comunidade científica. O avanço da tecnologia possibilitou a criação de aparelhos de medida diferenciados que permitiram a separação de cada uma das suas componentes e conhecer o seu comportamento. Entre estes aparelhos destaca-se o pireliómetro e o piranómetro.

O instrumento padrão utilizado para medir a combinação da irradiância direta e difusa numa superfície plana com um ângulo sólido de 2π sr é o piranómetro (figura 2.1.a). Este aparelho é utilizado em diversas áreas, incluindo a monitorização da eficiência de conversão de painéis fotovoltaicos ou para aquisição de dados meteorológicos.

Existem algumas especificações que aferem a qualidade dos piranómetros segundo a ISO (Organização Internacional de Normalização) e a WMO (Organização Meteorológica Mundial), como a resposta espectral ou resposta direcional. A resposta espectral é a sensibilidade dos sensores em medir radiação em função da variação do seu comprimento de onda e deve estar entre 0,3 e 3,0 μm de maneira a medir a maior parte do espectro solar. A resposta direcional, ou resposta de cosseno, diz-nos se o piranómetro cumpre a lei do cosseno de Lambert em que a intensidade do raio solar é proporcional ao cosseno do ângulo zenital (θ_z). Os piranómetros de alta qualidade têm uma resposta direcional de ± 10 W/m² para um raio de luz de 1000 W/m² até um ângulo zenital de 80°. Em anexo (pg. II) encontra-se a tabela completa com as características que os piranómetros devem cumprir e as suas classificações.

Ao contrário do piranómetro, que mede a radiação proveniente de todo o hemisfério, o pireliómetro (figura 2.1.b) está construído para medir apenas a irradiância direta normal incidente numa superfície (*Direct Normal Irradiance*, DNI). Deixa entrar a DNI através de um pequeno orifício, que deve estar diretamente apontado para o sol. Para isso é equipado com um seguidor solar que acompanha o movimento do sol ao longo do dia e mantém o aparelho alinhado com os raios solares.

O orifício do pireliómetro deve ter um meio ângulo de abertura ótimo de 2,5° segundo a WMO, de maneira a excluir toda a radiação difusa das medições. [13] Um dos problemas destes aparelhos começa com este meio ângulo, que se não for alinhado perfeitamente com o centro do disco solar irá receber radiação indesejada, como é o caso da CSI.

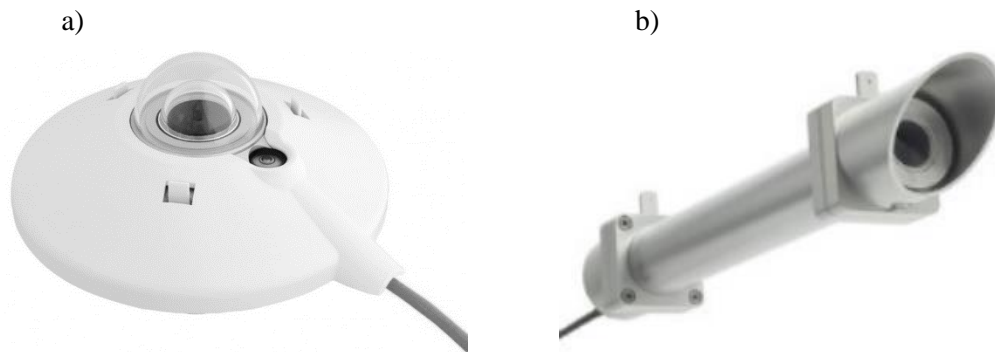


Figura 2.1 – a) Piranómetro da Kipp & Zonen; [14] b) Pireliómetro da Huskeflux; [15]

Tanto os pireliómetros como os piranómetros podem diferir dependendo do tipo de tecnologia que utilizam para medir a radiação solar. Estes podem estar equipados com termopilhas, que convertem energia térmica em energia elétrica ao gerar uma voltagem através de uma diferença de temperatura, ou sensores semicondutores de silício, que geram uma corrente proporcional à irradiância recebida. Estes últimos podem utilizar um fotodíodo ou uma célula fotovoltaica. [16] O piranómetro utilizado nesta dissertação utiliza termopilhas como sensores e por isso não será abordado o comportamento dos semicondutores de silício.

As termopilhas (figura 2.2 e 2.3) são dispositivos eletrónicos compostos por termopares que podem estar ligados em série ou em paralelo-série. Estes geram uma diferença de potencial (ΔV) linearmente proporcional à diferença de temperatura (ΔT) entre junções ativas (junções quentes, que estão por baixo da superfície preta recetora) e junções passivas (junções frias, que estão em contacto com o interior do piranómetro para uma temperatura constante). [17]



Figura 2.2 – Exemplo de uma termopilha da TE Connectivity [18]

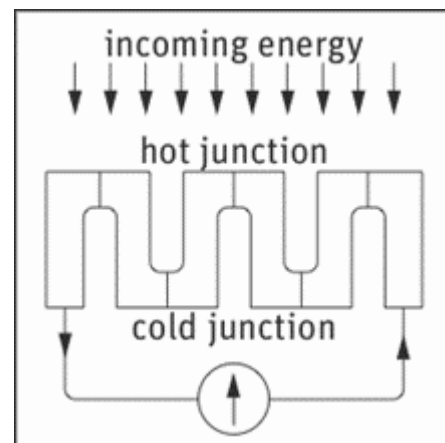


Figura 2.3 - Princípio de funcionamento de uma termopilha [17]

De maneira a proteger as termopilhas de fatores externos como chuva, poeira e vento, é fundamental estarem protegidas com uma cúpula de vidro para não afetar os resultados obtidos. Esta cúpula deve ser

de alta qualidade ótica e funciona também como filtro de radiação solar de ondas longas, limitando a distribuição espectral da radiação incidente entre 300 nm e 3000 nm aproximadamente.

2.2. Sistemas existentes de medição da radiação difusa

O grande problema em medir a radiação solar é a separação da DHI e a sua quantificação. O piranômetro tradicional apenas fornece dados de GHI, sendo posteriormente necessário converter para DHI através de modelos teóricos. Ou usar sistemas que utilizam vários aparelhos de medida em conjunto de maneira a retirar a DNI da GHI. Esta última opção é mais viável, uma vez que os modelos necessários para converter os dados de GHI para DHI assumem algumas condições que muitas vezes não acontecem na realidade, apresentando erros associados que comprometem a veracidade dos resultados.

De maneira a separar a DHI da GHI, existem vários sistemas que apresentam características diferentes de maneira a isolar a DHI. Existem sistemas que utilizam um piranômetro com um pireliômetro em conjunto de maneira a medir a GHI e a DNI em separado com alta precisão. Outros utilizam piranômetros com dispositivos de sombra (móveis ou estáticos) para obstruir a DNI.

O dispositivo de sombra mais prático e com menor custo é o anel estático (anel de sombra de Drummond) que pode ser facilmente instalado num piranômetro na horizontal (figura 2.4.a). Apesar de conseguir obstruir a DNI durante todo o dia sem a necessidade de partes móveis, este dispositivo obstrui uma pequena parte da cúpula celeste, interceptando uma parte da DHI. Este dispositivo requer uma rigorosa manutenção e calibração, tornando-o numa opção pouco viável para dados mais rigorosos ou em medições em sítios remotos. [19]

Os dispositivos de sombra móveis foram criados de maneira a ultrapassar estas limitações dos dispositivos estáticos e diminuir a área de sombreamento. Para isso são equipados com motores de passos que giram os dispositivos de sombra de maneira a acompanhar o movimento do sol desde o alvorecer até ao crepúsculo. Introduzindo dados locais como a latitude, longitude, altitude, data e tempo, estes aparelhos utilizam um sistema operativo onde são introduzidas as equações do movimento do sol, permitindo aos dispositivos de sombra estarem alinhados com o centro do disco solar. Alguns aparelhos mais sofisticados utilizam sistema GPS de maneira a serem alinhados em tempo real.

O radiômetro com faixa de sombreamento rotativa (RSR, *Rotating Shadowband Radiometer*) é um aparelho muito usado para medir todas as componentes da radiação solar (figura 2.4.b). Com uma boa relação preço-qualidade, este aparelho utiliza uma faixa de sombreamento que bloqueia um radiômetro (normalmente um piranômetro de fotodíodo) que se move de maneira a fazer 4 medições. Uma quando o radiômetro está totalmente exposto, de maneira a medir a GHI. E três quando a faixa está a bloquear o radiômetro, em que uma é quando o radiômetro está totalmente coberto, medindo a DHI, e as outras duas com uma diferença de 6° em relação ao centro do disco solar. Estas últimas medidas adicionais servem de fator de correção para a faixa de sombreamento, que cobre parte do campo de vista do piranômetro. [20]

O aparelho de medida que apresenta maior qualidade para medir a DHI e a DNI em separado é um seguidor solar com uma bola/disco de sombreamento (figura 2.4.c). A grande vantagem deste aparelho é a pequena área de sombreamento que o seu dispositivo utiliza para bloquear a DNI, sendo considerado o seu fator de correção praticamente negligível. Este aparelho é equipado com dois motores de passos de maneira a posicionar a bola no centro do disco solar em conjunto com dois piranômetros (um obstruído pela bola e outro não, obtendo a DHI e GHI respectivamente). E posicionar um pireliômetro adicional para dados de DNI mais precisos. É recomendado para medições científicas mais rigorosas e por isso tem um maior custo associado.

Existem outras alternativas para medir a DHI utilizando piranômetros, como o disco de sombra criado por de Oliveira, em que o disco fica estático durante todo o ano e o que se move é o piranômetro na direção N-S, dependendo do dia do ano. Esta é uma alternativa contrária ao anel de sombra de Drummund.

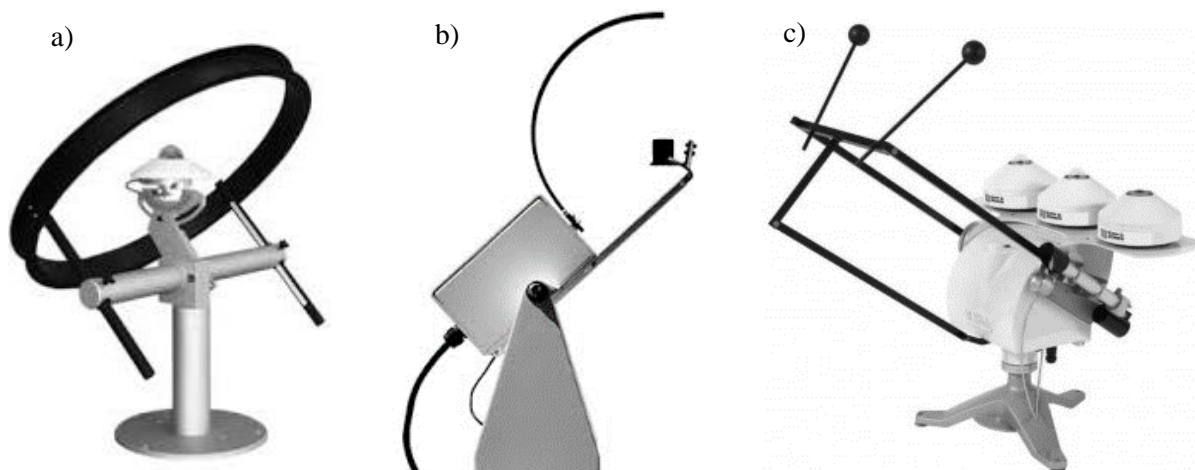


Figura 2.4 - Sistemas de medida que permitem calcular a DHI: **a)** Anel estático de Drummund; [21] **b)** RSR, Radiômetro com faixa de sombreamento rotativa; [22] **c)** Seguidor solar SOLYS2; [23]

Outra alternativa são os piranômetros que utilizam várias termopilhas num plano horizontal, onde alguns sensores são expostos ao sol e outros são tapados. O cálculo da DHI é baseado nos valores mínimos desses sensores. O piranômetro SPN1, que foi usado nesta dissertação, apresenta estas características e apresenta algumas vantagens em relação aos sistemas aqui apresentados.

2.3. Piranômetro SPN1

O aparelho de medida utilizado nesta dissertação foi o piranômetro SPN1 da *Delta-T Devices* (Figura 2.5.a). Este aparelho tem uma velocidade de resposta de 200 milissegundos, o que lhe permite medir a GHI e a DHI rapidamente sem ter de esperar os habituais cinco minutos dos piranômetros *standard*. O aparelho fornece dados em W/m^2 e estima o *sunshine status*, que nos dá o valor um para o céu limpo ou zero para o céu coberto. Não precisa de estar orientado para Norte, pois mede com precisão em qualquer direção, desde que seja montado na horizontal. Não é necessário introduzir a latitude nem a longitude para os seus cálculos e funciona em qualquer uma de ambas. Em anexo (pg. II) encontra-se a classificação do SPN1 segundo os padrões da WMO e ISO para piranômetros.

A grande vantagem deste piranômetro é dispensar os dispositivos móveis de sombra, uma vez que utiliza uma “máscara de sombra” (figura 2.5.b) especialmente projetada para funcionar em conjunto com sete termopilhas alinhadas hexagonalmente (seis em hexágono e uma no centro, como se pode ver na figura 2.5.c). Esta máscara, designada por “*shadow mask*” [24], permite três condições em que:

- Pelo menos uma termopilha esteja sempre exposta aos raios solares.
- Pelo menos uma termopilha esteja coberta em relação aos raios solares.
- Todas as termopilhas recebem a mesma quantia de luz difusa proveniente da cúpula celeste.

A terceira condição só é válida porque a *shadow mask* corresponde a um ângulo sólido equivalente a π (π), ou seja, metade do ângulo sólido hemisférico. Assumindo que a radiação difusa vinda do céu é isotrópica, todos os sensores devem receber cerca de 50 % de DHI.

Para nos dar os valores de DHI e GHI, o piranômetro está programado para fazer os seguintes cálculos [6]:

- Se todos as termopilhas recebem a mesma quantidade de radiação difusa isotrópica e esta corresponde a 50% de todo o hemisfério, a DHI será o dobro do valor da termopilha que tiver menor valor (MIN), ou seja, a que se encontrar totalmente coberta pela *shadow mask*. ($DHI = 2 \times MIN$)
- A BHI será a subtração do valor máximo lido (MAX, termopilha que se encontrar totalmente exposta aos raios solares) pelo valor mínimo (MIN). Ou seja, será a BHI menos metade da DHI, visto que a termopilha que recebe MAX também recebe metade da DHI. ($BHI = MAX - MIN$)
- A GHI é a soma da irradiação direta com a irradiação difusa. ($GHI = BHI + DHI = MAX + MIN$)

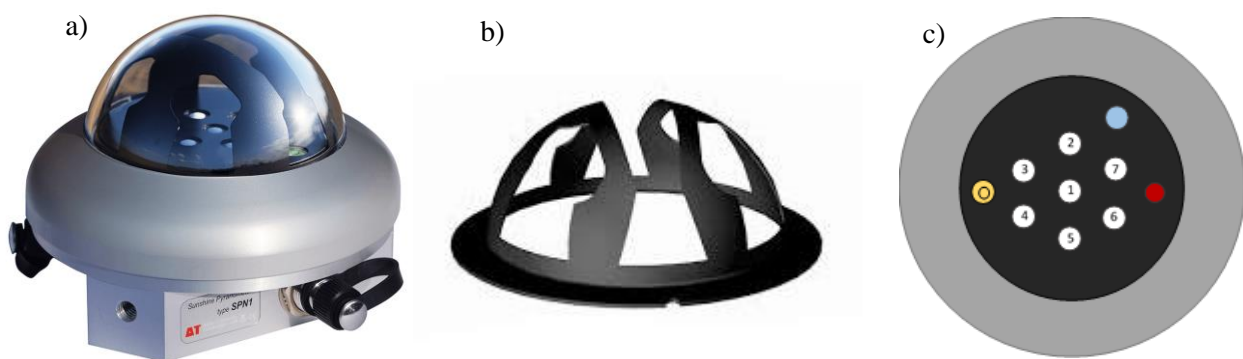


Figura 2.5 – a) Piranômetro SPN1 utilizado nesta dissertação; b) *Shadow Mask*; c) Vista de cima do SPN1 com a numeração das termopilhas

Incertezas do SPN1

Badosa [6] apresenta alguns casos que causam incertezas em relação aos dados obtidos pelo piranômetro SPN1:

1. Uma má calibração entre termopilhas pode causar picos de radiação direta nos resultados quando o sol muda de posição, trocando a termopilha que está completamente exposta.
2. Dependendo da posição do sol, a cúpula de vidro que protege as termopilhas pode deformar a luz à sua passagem e causar uma pequena disparidade entre estes sensores.
3. Dependendo do ângulo solar zenital, a resposta direcional da termopilha pode causar uma mudança de resposta de radiação direta do sensor.
4. As termopilhas do SPN1 têm uma baixa sensibilidade de luz azul. Isto causa uma diminuição da resposta espectral na parte azul do espectro solar, originando uma variação de sensibilidade da radiação difusa entre dias de céu limpo e dias de céu nublado. Apesar de ser aplicada uma correção no sistema do SPN1 para esta limitação, ainda apresenta alguns erros.

5. A *shadow mask*, que permite a obstrução e exposição das termopilhas aos raios solares em simultâneo, tem um formato que permite o SPN1 ter um ângulo de abertura efetivo de $\pm 5^\circ$ a $\pm 20^\circ$, dependendo da posição do sol. Isto tem impacto na divisão da radiação total em DHI e BHI, especialmente quando o brilho nas imediações do sol é mais intenso.

Este último ponto é importante para esta dissertação, uma vez que é desejado a medição da DHI com bom rigor. Como o SPN1 mede a DHI baseando-se no menor valor que lê das 7 termopilhas, é induzida uma incerteza na sua medição ao assumir que a radiação difusa é isotrópica, visto que cada termopilha vê uma diferente parte do hemisfério que nem sempre corresponde a 50% de DHI, especialmente em dias de céu limpo ou pouco nublado. Em casos em que mais do que uma termopilha está completamente coberta do sol, o algoritmo do piranómetro vai sempre considerar o menor valor lido para calcular a DHI, podendo ser subestimada.

O cálculo da radiação direta é feito entre a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo obtido pelas termopilhas. Quando mais de uma termopilha está exposta ao sol, o valor utilizado para calcular a BHI será sempre o valor máximo lido. Este valor máximo pode incluir uma grande parte de radiação difusa circumsolar (CSI), sobrestimando a BHI e subestimando a DHI.

Para obter os dados finais de DHI e GHI, o SPN1 faz umas pequenas correções devido a alguns destes pontos. A DHI, que é calculada a partir do valor mínimo, recebe uma correção de 1,02 devido a uma sistemática tendência a existir uma diferença de 1% a 2% entre os valores das termopilhas quando estas estão sobre as mesmas condições de luz. Existe também uma correção de 0,99 na BHI e 1,14 na DHI devido à diferente sensibilidade das termopilhas à luz direta e difusa sob as mesmas condições de luz.

2.4. Medição da distribuição angular da radiação difusa

Um estudo realizado em 2014 na Universidade Técnica da Dinamarca tinha como objetivo estudar a distribuição angular da radiação difusa e a sua variação em tempo real com a passagem de nuvens. [25] Para isso foi feita uma experiência onde instalaram oito piranómetros na horizontal, em que cada um media apenas a radiação global proveniente de cada direção cardinal. Como os piranómetros utilizados apenas mediam radiação global, foi instalado uma cúpula metálica em cada aparelho que permitia ver apenas um oitavo de todo o hemisfério.

Em conjunto com os piranómetros, recorreram a um seguidor solar equipado com bolas de sombreamento para medir a DHI, e também com um pireliómetro para medir a DNI. Este aparelho servia de termo de comparação, que media DHI em todo o hemisfério e a DNI para subtrair às radiações difusas fracionais cujas direções estavam expostas à DNI.

Depois de realizado o estudo e analisando os dados, os investigadores notaram que a soma das oito radiações difusas fracionais obtidas pelos piranómetros eram idênticas à DHI total obtida pelo seguidor solar em dias de céu nublado. No entanto, em dias de céu limpo, verificou-se um aumento da DHI nas direções à passagem do sol.

Os resultados obtidos neste estudo revelaram que a radiação difusa fracional nas direções expostas à passagem do sol era superior à obtida nas restantes direções, o que implica que a DHI é bastante influenciada na presença de radiação direta. Isto mostra que a anisotropia da radiação solar em dias de céu limpo ou pouco nublado pode ser um problema na medição de radiação solar, especialmente quando

o ângulo de abertura dos aparelhos de medição é superior ao valor padrão de um pireliômetro, que pode incluir a CSI nos dados de DNI, ao contrário de ser incluída na DHI.

Capítulo 3 – Metodologia

No âmbito desta dissertação, foi desenvolvido um sistema que permite medir a distribuição angular da GHI e a DHI em separado, sem a necessidade de dispositivos móveis de sombra a bloquear o sol durante o dia. Construído com materiais de baixo custo, este sistema foi projetado para suportar três piranômetros SPN1 e para funcionar em condições meteorológicas moderadas. Em anexo (pg. I e II) encontra-se imagens das experiências executadas pelo sistema de medida.

3.1. Apresentação do sistema

O sistema de medida desenvolvido nesta dissertação foi baseado em Raspberry Pi e projetado de maneira a poder medir GHI e DHI de $3,5^\circ$ em $3,5^\circ$ (ângulo azimutal) ao longo de todo o hemisfério. Está equipado com três piranômetros SPN1 que estão alinhados em 3 planos diferentes: 0° , 45° e 90° .

Para poder percorrer toda a área visível foi instalado um motor de passos 440-458 da RS Pro, que com a ajuda de duas rodas dentadas tinha força suficiente para fazer girar os piranômetros 360° . Como se pode ver na figura 3.3, foi utilizada uma caixa azul impermeável para proteger os componentes eletrônicos da água da chuva. Estes componentes estão representados na figura 3.1 e são compostos por um microcomputador Raspberry Pi, uma fonte de alimentação PMT-12V35W1A da Delta Electronics e uma placa de circuitos impressa (*shield*) para facilitar a ligação de todos os componentes ao Raspberry Pi.



Figura 3.1 - Componentes eletrônicos do sistema: 1. Fonte de alimentação; 2. Motor de passos; 3. Switch; 4. Shield; 5. Raspberry Pi



Figura 3.2 - Apresentação do sistema de medida.

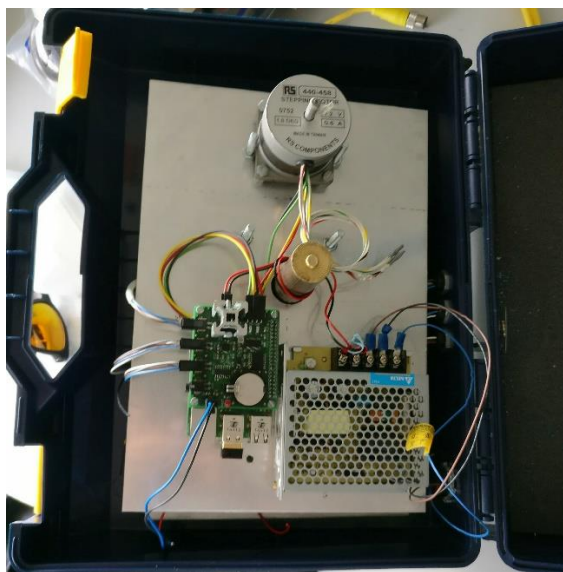


Figura 3.3 - Interior da caixa protectora com os componentes eletrônicos montados.

Como se pode ver pela figura 3.2, o sistema foi construído na sua maioria em alumínio, à exceção da placa interior, que foi feita em chapa de aço para suportar o peso dos piranômetros. A meio do sistema foi incorporado um cilindro de latão de maneira a nivelar a caixa protetora e não a deformar com o movimento dos piranômetros.

De maneira a instalar os circuitos de forma ordenada e segura, foi desenhada uma chapa de alumínio onde se fixavam todos os componentes eletrônicos e instalada na parte de cima da caixa de maneira a proteger os circuitos da água da chuva, caso esta entre na caixa. Os cabos responsáveis por fazer a ligação entre os piranômetros e o Raspberry Pi, e o cabo de alimentação, são todos à prova de água, - diminuindo o risco de entrada de água no sistema.

A elevada complexidade do sistema obrigou ao desenvolvimento de uma *shield* para o microcomputador Raspberry Pi, que sem ela seria extremamente confuso a ligação de todos os componentes ao seu GPIO^a. A esta *shield* ainda foi incorporado um LED que se liga a cada medição feita pelo sistema, um RTC (*Real Time Clock*) que mantém o tempo atualizado no sistema mesmo se desligado da corrente^b. Há também um sensor de temperatura para medir a temperatura dentro da caixa e um botão de fim de curso (*switch*), que quando empurrado dá indicação ao sistema de que este está no ponto inicial.

A fonte de alimentação adicionada ao sistema da Delta Eletronics é de 12 V, visto que o motor de passos utilizado no sistema é alimentado a 12V. Foi por isso necessário adicionar um regulador de tensão de 5 V na *shield*, devido à alimentação do Raspberry Pi ser de 5 V. Neste regulador de tensão foi ainda instalado um dissipador de calor de maneira a não deixar elevar a temperatura a um estado crítico e causar o sobreaquecimento do sistema.

^a GPIO (General-purpose input/output), são portas programáveis de entrada e saída de dados que são utilizadas para fazer ligações entre uma interface e periféricos.

^b O Raspberry Pi atualiza o seu relógio quando ligado à Internet, que não tinha acesso no local das experiências. Para evitar atualizar o tempo manualmente, foi essencial incorporar um RTC no sistema.

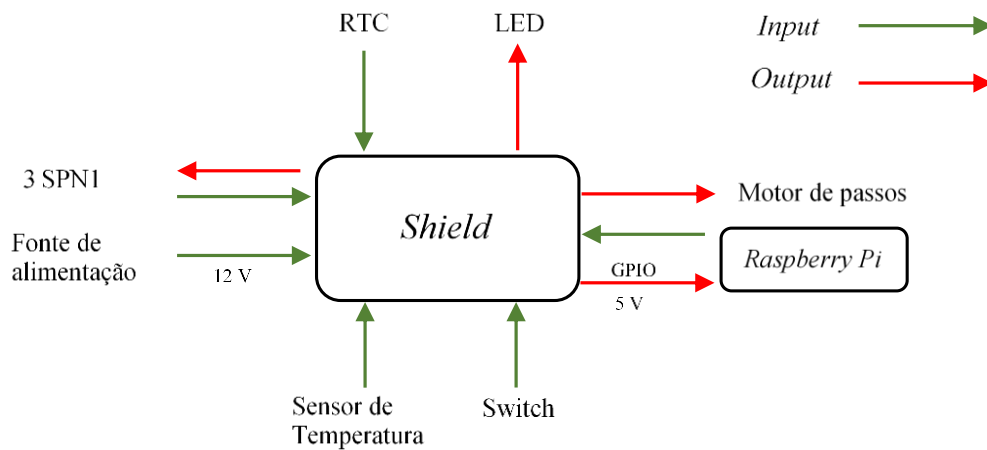


Figura 3.4 - Fluxograma simplificado dos inputs e outputs da shield

3.2. Configuração do motor

Ao instalar o motor de passos neste projeto, era necessário ter em conta o seu ângulo de passo de maneira a contabilizar o número total de passos para completar uma volta inteira. O motor de passos utilizado neste projeto tinha um ângulo de passo de $1,8^\circ$, eram por isso necessários 200 passos para completar 360° . De maneira a diminuir o número de passos, o Raspberry Pi foi programado para fazer o motor dar 10 passos seguidos, ou seja, um passo maior de 18° .

Tabela 1 - Especificações técnicas do motor de passos

Motor de Passos RS Pro 440-458

Tensão nominal (V)	12
Corrente nominal (A)	0,6
Torque de Retenção (mNm)	500
Torque Residual (mHm)	30
Indutância (mH)	32
Resistência (Ω)	20
Ângulo de passo	1,8

Quando se aumentou o número de passos seguidos do motor, notou-se que o movimento do sistema não era fluído e que o motor estava em esforço. Quando acabava a volta a que tinha sido programado, não concluía 360° , ficando um pouco atrasado em relação ao ponto final. O grande problema em induzir o motor a fazer passos seguidos, é que ele perde força, uma vez que quanto maior a velocidade, menor vai ser o seu binário [26]. Outra explicação para o motor não concluir uma volta inteira é a possibilidade de este ter operado a uma frequência de ressonância. Explicando o aumento do ruído e vibração quando

este estava a operar, e por sua vez a oscilação e a perda de passos. Em anexo (pg. III) encontra-se o gráfico de torque vs. velocidade do motor de passos utilizado.

De maneira a ultrapassar este problema, foi instalado adicionalmente ao sistema duas rodas dentadas de maneira a desmultiplicar o movimento do eixo do sistema e por sua vez aumentando o binário do motor. Aplicou-se uma roda dentada de 24 dentes ao eixo do motor e uma de 120 dentes ao eixo do sistema, criando assim um fator de desmultiplicação de 5:1. Feito isto, o ângulo dos 10 passos seguidos passou a ser 3,6°.

Apesar da aplicação de rodas dentadas ter aumentado a força do motor, este ainda apresentava indícios de estar a operar a uma frequência de ressonância. Apresentava ainda um contínuo esforço e um movimento pouco fluído. Prosseguiu-se então a uma programação mais meticulosa dos 10 passos seguidos de maneira a que o motor deixasse de operar à sua frequência natural. Em vez de induzir o motor a fazer 10 passos iguais de uma vez, dividiu-se estes passos por grupos. Nos primeiros grupos o motor começava o seu movimento a baixa velocidade, aumentando o binário do motor para pôr o sistema em movimento. Nos grupos do meio aumentou-se a velocidade, uma vez que o sistema já estava em movimento e precisava de um menor binário. Nos últimos grupos diminuiu-se novamente a velocidade, de maneira a suavizar o movimento do sistema quando este parava o seu movimento.

Depois de tornar o movimento do sistema mais fluído, notou-se novamente que o sistema não completava 360°, ficando alguns passos atrasado. Apesar de ter sido adicionado duas rodas dentadas de maneira a aumentar a força do motor, o peso dos três piranómetros SPN1 e a inércia do sistema continuava a ser um problema. Foi então necessário aumentar o número de passos “grandes” para obrigar o sistema a concluir uma volta inteira. Portanto, o sistema fazia um total de 104 passos grandes (em que cada passo grande fazia 10 passos seguidos), equivalendo a aproximadamente 3,5° a cada medição.

Para o sistema dar uma volta inteira depois de completar 104 passos, este precisava de aproximadamente 5 minutos. Esta é uma das grandes limitações deste projeto, já que ao invés de medir a radiação proveniente de todas as direções instantaneamente, demora algum tempo mais (5 min). Apesar de 5 minutos corresponder apenas a 1,25° de ângulo horário solar ($\omega = 15^\circ$ por hora) em que o sol se desvia da mesma posição e corresponder a aproximadamente 0,85% do movimento total diário solar, não deixa de não ser uma medição instantânea.

Quando o sistema concluía uma volta inteira, ou seja, quando concluía 104 passos grandes, este foi programado para inverter a direção da sua rotação de maneira a voltar ao ponto inicial. Para dar indicação ao Raspberry Pi de que este tinha chegado ao ponto inicial de medida, foi adicionado um *switch* no topo da caixa protetora. O sistema tinha uma patilha instalada que quando chegava ao ponto inicial, esta carregava no *switch* e imobilizava o sistema. Dando a indicação de que o sistema podia começar uma volta nova.

Inicialmente pensou-se em apenas um switch para dar indicação ao sistema onde era o ponto inicial. Um dos melhoramentos possíveis deste projeto seria a adição de um segundo switch para dar a indicação do ponto final.

3.3. Comunicação com os piranómetros

O piranómetro SPN1 tem um microprocessador próprio que é responsável por avaliar todos os valores das sete termopilhas a cada medição e realizar cálculos e correções de maneira a calcular a GHI e a DHI.

Este mesmo microprocessador está preparado para receber instruções e enviar os dados que lhe são pedidos.

Para a aceder aos dados obtidos pelo piranómetro SPN1, foi necessário ligar um cabo RS232 pela sua porta série e conectá-lo ao Raspberry Pi. O SPN1 quando ligado a uma porta série, apesar de estar a receber energia, não vai estar constantemente a fazer medições. Vai estar num modo chamado *Sleep mode* em que aguarda instruções para enviar as informações de radiação que está a receber naquele momento. Este processo repete-se a cada passo grande do motor, ou seja, depois de percorrer 3,5°. No intervalo de cada passo, o Raspberry Pi envia comandos para o três SPN1 instalados no sistema para saírem do *Sleep mode* e enviarem de volta os dados de radiação que estão a receber no momento.

Apesar de os dados serem armazenados no microcomputador Raspberry Pi, era fundamental estar a aceder diretamente ao funcionamento do sistema para o caso de algo correr mal. Para ser possível interromper o sistema se necessário ou mesmo para iniciar ou acabar o dia de medidas, fez-se uma ligação remota entre o Raspberry Pi e um computador instalado numa sala perto do local de medições.

Resumindo, os piranómetros SPN1 quando ligados ao sistema de medida, recebem radiação vinda de todo o hemisfério que é convertida em sinal digital pelas termopilhas. Como dito anteriormente, o SPN1 tem um microprocessador que interpreta os sete sinais digitais das termopilhas e faz o cálculo entre estes sinais para converter para DHI e GHI. Ao ligar o SPN1 ao Raspberry Pi através de uma porta série, este envia os dados em formato ASCII que são guardados num ficheiro de texto no Raspberry Pi. A cada passo do motor, este processo é repetido até finalizar todos os passos a que foi programado. No final do dia de experiências, o Raspberry Pi armazena um único ficheiro de texto com todas as medições e as horas exatas em que foram efetuadas.

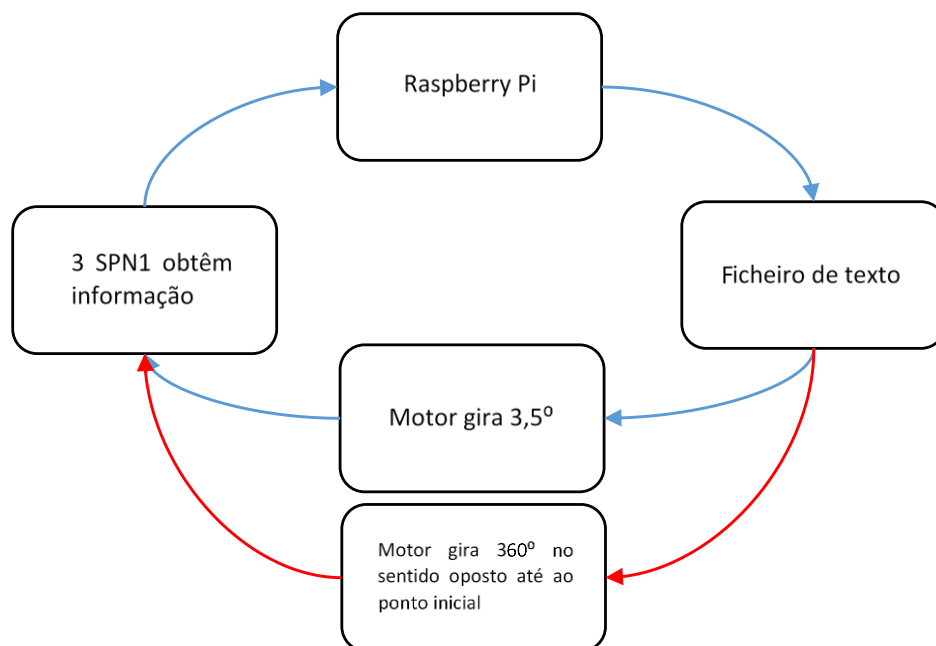


Figura 3.5 - Fluxograma dos passos que o sistema faz desde os piranómetros até ao utilizador

Capítulo 4 – Caracterização da área de estudo

Depois do sistema estar operacional e devidamente programado, processo que levou alguns meses de trabalho, procedeu-se a uma série de experiências de maneira a ser testado e finalmente medir a radiação difusa ao longo de todo o hemisfério, que é o objetivo da presente dissertação. O local das experiências foi o terraço do edifício C1 da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Portugal, com coordenadas $38,75642^{\circ}$, $-9,15676^{\circ}$.



Figura 4.1 - Imagem aérea retirada do Google Earth que demonstra o local das medições e os obstáculos nas redondezas (fonte: Google Earth).

Como se pode ver pela figura 4.1, o sistema de medida tinha alguns obstáculos que interferiam com as medições ao longo do dia. Para medições feitas na horizontal estes obstáculos eram pouco relevantes, mas para as medições feitas a 45° e 90° estes já podiam ter algum impacto para algumas direcções.

A Oeste estava o edifício C6 que apesar estar a uma boa distância do edifício C1, poderia ter algum impacto ao final do dia quando o sol estava a poente. O edifício C8 estando a Norte, apenas poderia interferir através de reflexões da radiação incidente no edifício, semelhante à radiação refletida no chão que é apenas captada pelos piranómetros inclinados.

O obstáculo mais significativo foi uma parede que se situava aproximadamente a Sul. Através da figura 4.2 podemos ver que ao nascer do sol, este estava totalmente obstruído, afetando assim os dados no início da manhã. Apesar de estar a 6,60 m do sistema de medida, a parede tinha 3,5 m de altura, o que afetaria os dados praticamente na totalidade. Para diminuir o impacto nas medições, o sistema foi instalado numa estrutura metálica de maneira a aumentar a sua altura. Através da figura 4.2 é possível perceber o impacto que a parede tem no campo de visão do sistema de medida.

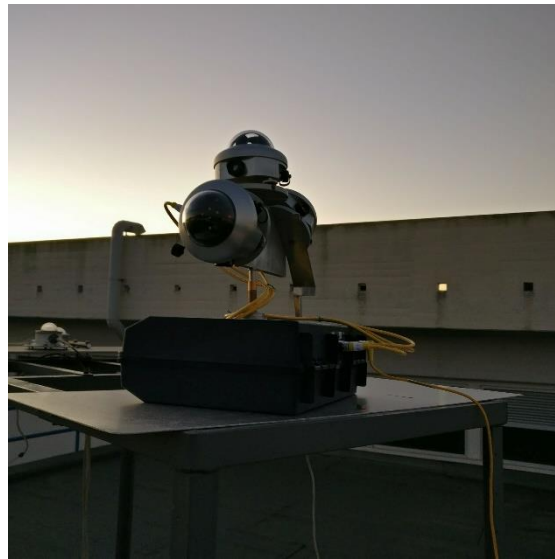


Figura 4.2 - Sistema de medida em funcionamento de manhã, alinhado com a parede a Sul

A radiação direta incidente era obstruída apenas no início do dia, uma vez que o sol era bloqueado no início da manhã, como é referido anteriormente. Já a radiação difusa isotrópica era uma boa parte bloqueada pela parede. Para ter uma ideia melhor de como a parede que está a Sul afeta os dados obtidos pelo sistema, fez-se uma representação em Matlab da variação da altura solar ao longo do segundo dia de medições (figura 4.3). Através de uma relação trigonométrica e sabendo a altura a que estava o sistema de medida e a altura da parede, foi possível determinar o ângulo de obstrução. Posteriormente foi possível calcular como a parede poderia afetar quantitativamente a radiação difusa isotrópica proveniente de Sul (figura 4.4).

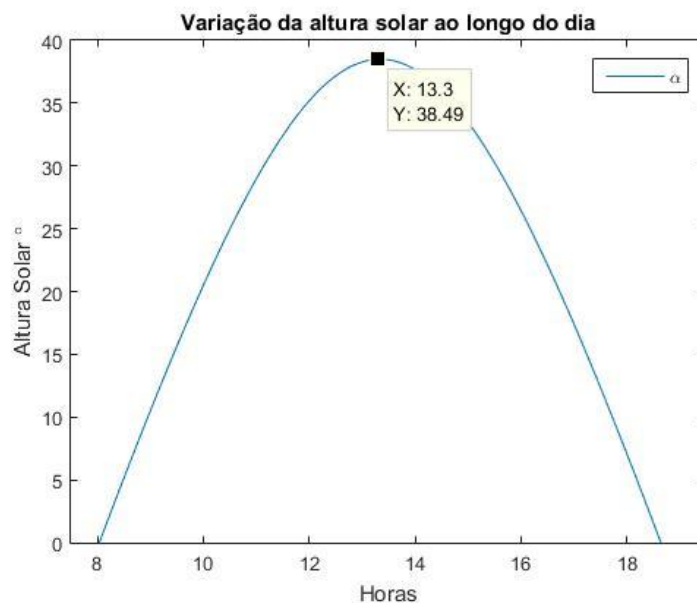


Figura 4.3 - Representação em Matlab da variação da altura solar ao longo do dia 25/10/2017

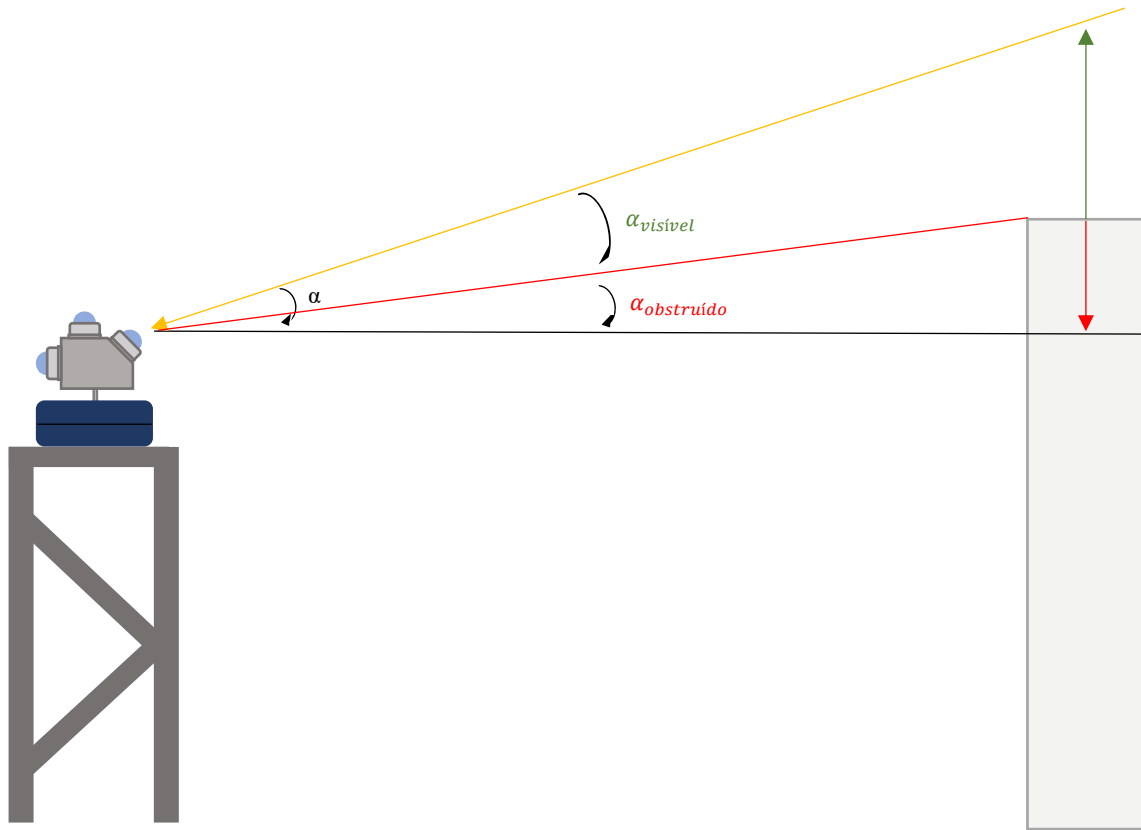


Figura 4.4 - Representação do impacto da parede a Sul no campo de visão do sistema de medida

$$\%_{DHI\ obstruída} = \frac{\alpha_{obstruído}}{\alpha} \times 100 \quad (3)$$

Utilizando a expressão 3, foi calculado que para os piranômetros inclinados do sistema, é esperado que os dados de radiação obtidos provenientes de sul sejam afetados aproximadamente em 30% quando o sol está no seu ponto mais alto, principalmente para o piranômetro a 90°.

Capítulo 5 – Resultados

As primeiras três experiências foram realizadas em dias seguidos nos dias 24, 25 e 26 de outubro de 2017 de maneira a que os valores de radiação fossem o mais semelhantes possível entre eles. Posteriormente foram realizadas outras experiências para aferir os resultados obtidos pelo sistema.

5.1. Validação do sistema

De maneira a ler os dados obtidos por um piranômetro SPN1 é necessário recorrer a um computador ou outro dispositivo que faça comunicação em série como por exemplo um Arduino ou um Raspberry Pi. A maneira mais fácil seria ligar o SPN1 diretamente a um computador e instalar o programa fornecido pelo fabricante (SunRead). É apenas necessário um computador com uma entrada RS232 ou um adaptador RS232-USB no caso de computadores mais recentes, e um cabo RS232 para fazer a ligação.

No caso de leituras em períodos longos, o fabricante aconselha o uso de um Data Logger para obter medições mais precisas. Mas neste caso não se justificava visto que apenas foram feitas medições de um dia para efeitos de validação do sistema de medida desenvolvido.

Uma vez que o sistema utiliza um Raspberry Pi que teve de ser programado para receber e ler os dados enviados pelo piranómetro, era necessário comparar esses dados com outro método de leitura que fosse fidedigno. Assim seria possível comprovar se não havia erros associados à construção e programação do sistema de medida.

Para testar e validar o sistema de medida, foi realizada uma primeira experiência que consistiu em medir em simultâneo dois piranómetros SPN1 na horizontal. O primeiro ligado ao sistema de medida desenvolvido nesta dissertação e o segundo ligado ao computador utilizando o programa SunRead, que constitui a nossa referência (figura 5.1). No final da experiência, ambos os resultados foram comparados de maneira a avaliar a precisão do sistema.

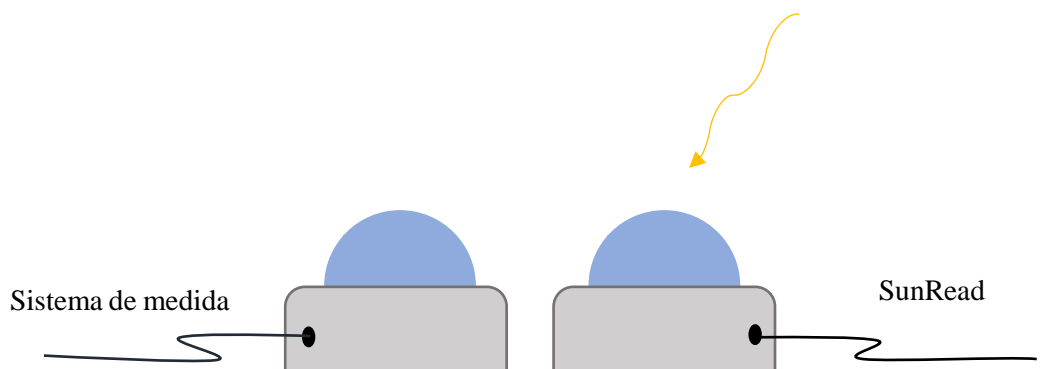


Figura 5.1 - Esquema da primeira experiência em que são feitas medidas simultâneas usando a programa do fabricante e usando o sistema desenvolvido

No dia em que se realizou esta experiência, 24 de outubro de 2017, o céu manteve-se sempre limpo. O nascer e o pôr do sol foram às 07:55h e 18:44h, respetivamente. O meio dia solar, momento de passagem do sol pelo meridiano local e o topo do seu movimento, foi por volta da 13:20h.

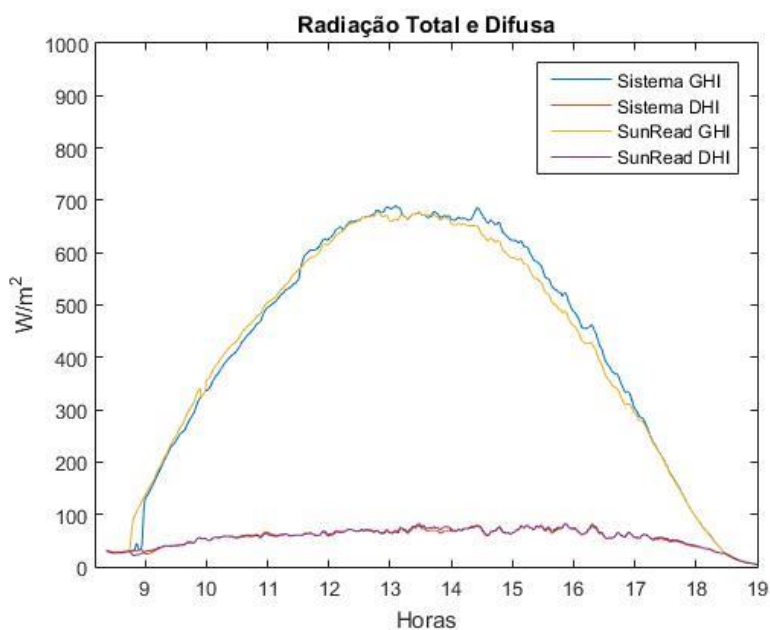


Figura 5.2 - Comparação entre os dados obtidos pelo sistema de medida e o programa do fabricante (SunRead) ao longo do dia

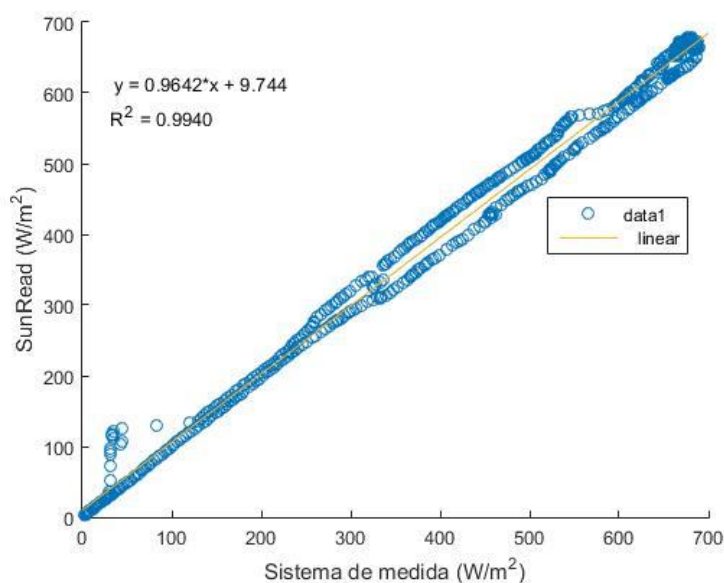


Figura 5.3 – Comparação entre os dados obtidos pelo programa SunRead e os dados obtidos pelo sistema de medida

Pela observação das figuras 5.2 e 5.3 podemos constatar que os dados obtidos pelo sistema de medida são muito aproximados aos dados obtidos pelo programa SunRead, com uma correlação linear na ordem dos 99,4%. No entanto o declive obtido pela reta de ajuste foi de 0,96, significando que o sistema de medida mediu valores superiores aos do SunRead. Esta diferença de valores pode estar associada a diferenças no número de medições feita ao longo de um minuto^c por cada um dos sistemas, resultando num erro acumulado quando é feito o cálculo das médias por minuto.

De forma a validar o sistema, a comparação dos dados obtidos pelo programa Sunread e pelo sistema de medida não pareceu suficiente, uma vez que, ainda que medido por sistemas diferentes, estar-se-ia apenas a comparar dados obtidos pelo mesmo tipo de sensor, o piranómetro SPN1.

Para ter um termo de comparação com outro piranómetro, procedeu-se a uma análise dos dados de GHI e DHI (à mesma escala), obtidos pelo seguidor solar situado no Campus Solar da FCUL (bastante aproximado à localização do sistema de medida). O seguidor solar está equipado com um piranómetro MS-802 da EKO [27] e um pireliómetro MS-57 da EKO [28]. O piranómetro é classificado “*Secondary Standard*” e o pireliómetro “*First Class*” segundo as normas da ISO, que são considerados de alta qualidade e boa qualidade, respetivamente. Ver em anexo (pg.II) a classificação dos piranómetros segundo as normas da ISO.

^c Em ambos os casos foram feitas medidas de 2 em 2 segundos, apesar do sistema de medida nem sempre cumprir este tempo. Por vezes medindo de 3 em 3 segundos.

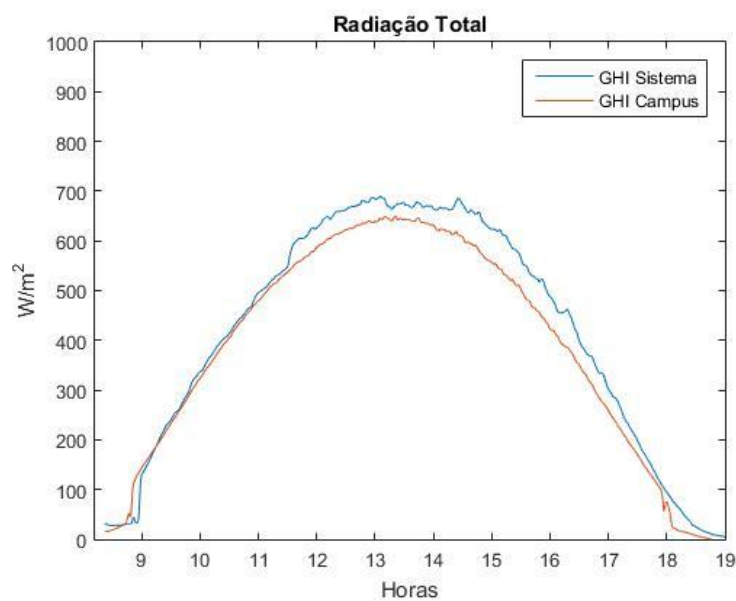


Figura 5.4 - Comparação entre os dados de GHI obtidos pelo sistema e pelo Campus Solar

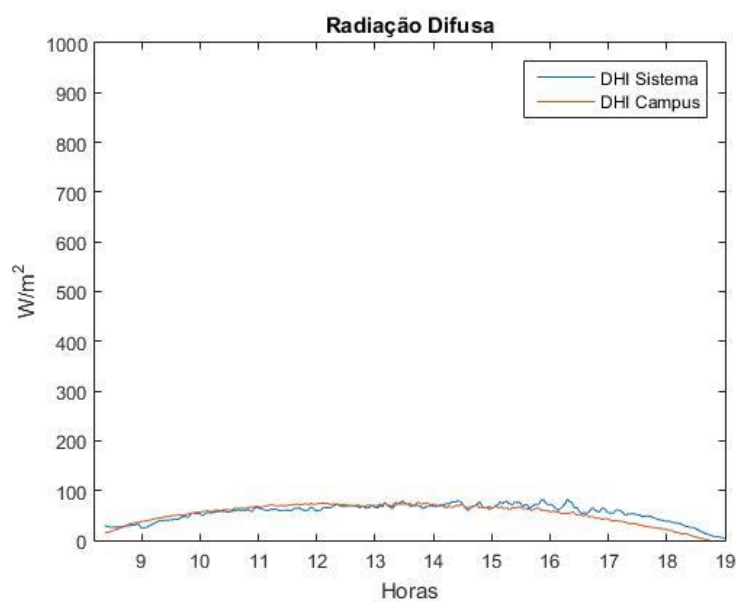


Figura 5.5 - Comparação entre os dados de DHI obtidos pelo sistema e pelo Campus Solar

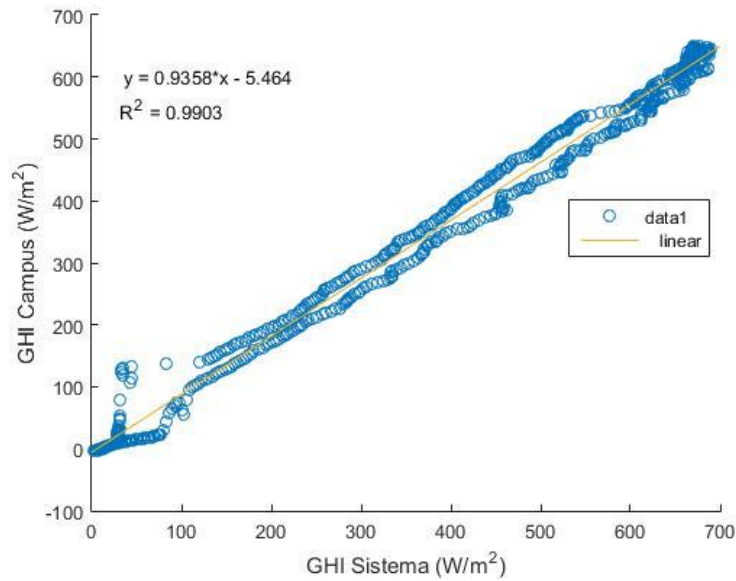


Figura 5.6 - Regressão linear entre a GHI obtida pelo Campus e a GHI obtida pelo sistema de medida

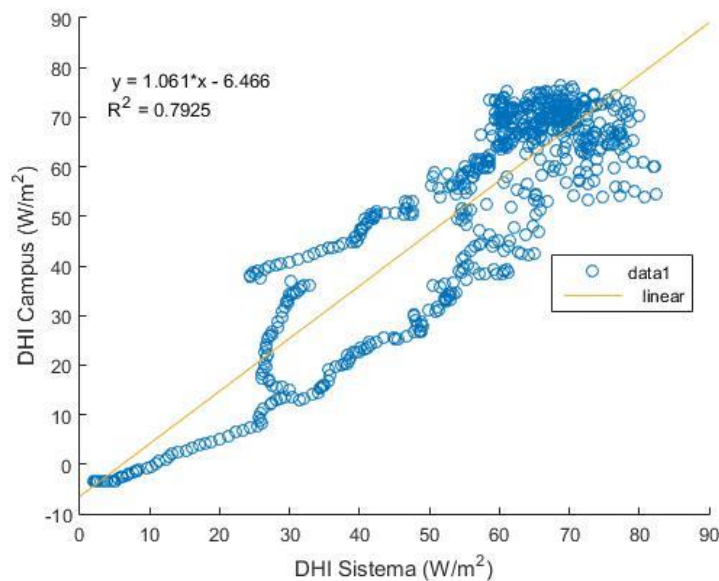


Figura 5.7 - Regressão linear entre a DHI obtida pelo Campus e a DHI obtida pelo sistema de medida

Através das figuras 5.4 e 5.6 podemos ver que os dados de GHI obtidos pelo sistema são muito aproximados aos dados obtidos no Campus Solar, obtendo uma correlação linear de 99,03%. Olhando para as figuras 5.5 e 5.7 podemos ver que os dados de DHI obtidos pelo sistema são um pouco menos aproximados aos dados obtidos no Campus Solar, resultando numa correlação linear de 79,25%.

5.2. Verificação com os piranômetros

A segunda experiência tinha como objetivo perceber se todos os piranômetros estão a medir corretamente nas devidas orientações e analisar a diferença dos valores de radiação para diferentes inclinações. Para isso foi utilizado o sistema de medida sem que este estivesse em rotação, orientando para Sul o piranómetro a 45° e para Norte o de 90° (figura 5.8).

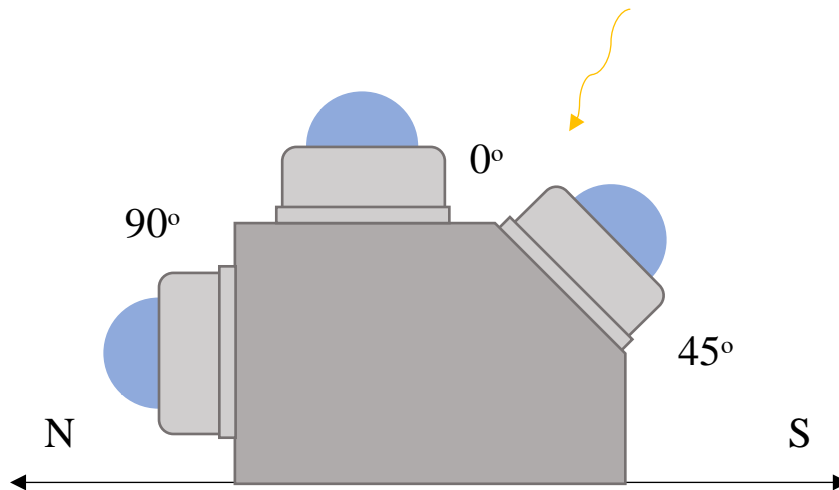


Figura 5.8 – Esquema da segunda experiência onde o sistema está parado a receber dados durante um dia

O dia da segunda experiência começou com céu limpo mas durante a tarde teve ocorrência de passagem de nuvens. Como as experiências foram realizadas em dias seguidos, as horas de nascer, pôr do sol e meio dia solar são idênticas.

Com a realização desta experiência foi possível confirmar que a parede que se encontrava a sul não estava de todo a sul, mas sim a su-sueste (SSE). Uma vez que o piranómetro que estava a 45° foi orientado perpendicularmente a essa parede.

Os resultados obtidos pela segunda experiência estão representados nas figuras 5.9 e 5.10.

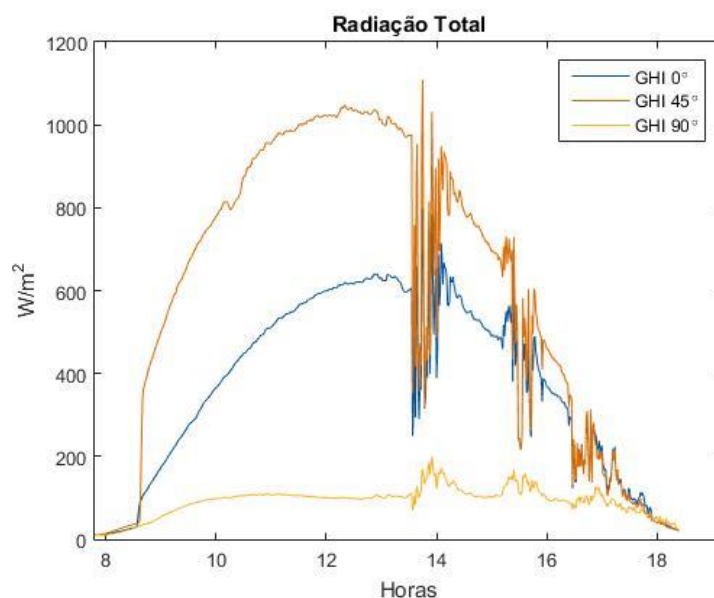


Figura 5.9 - Resultados obtidos de GHI pela segunda experiência

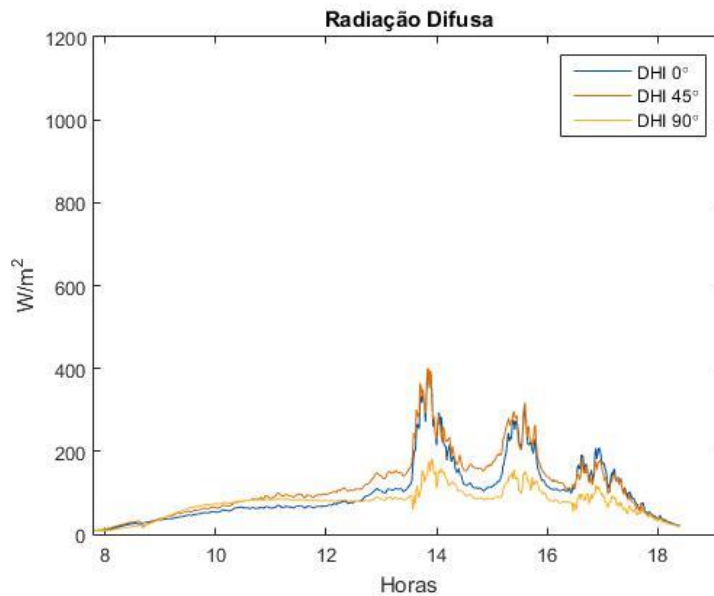


Figura 5.10 - Resultados obtidos de DHI pela segunda experiência

Através da figura 5.9 é possível perceber que durante a tarde houve passagem de nuvens ao observar as anomalias detetadas na GHI. Também é possível observar isso através do gráfico da DHI. Uma vez que a passagem de nuvens não deixa que a radiação direta chegue ao solo, espalhando-se uniformemente por toda a atmosfera e resultando em picos de DHI (figura 5.10).

Ao analisar o piranômetro que estava na horizontal, é possível perceber que os dados de GHI são idênticos aos valores obtidos na primeira experiência. O piranômetro que estava a 90° apenas deveria ler DHI, uma vez que estava orientado a norte e não incide BHI nesta orientação. Isto pode ser observado através do gráfico de GHI, onde os dados obtidos são iguais aos dados obtidos de DHI.

Para o piranômetro que estava a 45° e orientado para sul, seria esperado que o meio dia solar correspondesse ao mesmo que o piranômetro a 0°. Isto não aconteceu uma vez que o piranômetro a 45° foi alinhado em perpendicular com a parede que se encontrava a su-sueste (SSE). Para perceber melhor o motivo do desvio do pico solar em relação ao meio dia solar que ocorre exatamente a sul, recorreu-se à ferramenta Matlab utilizando as equações do movimento do sol e representou-se o ângulo incidente para esta superfície (figura 5.11).

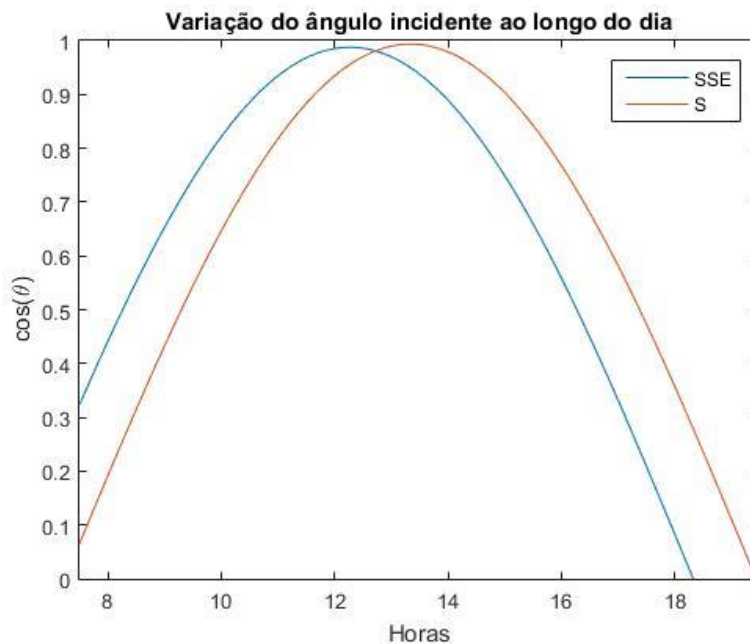


Figura 5.11 - Variação do ângulo de incidência para um plano orientado a S e a SSE com inclinação 45°

O cosseno do ângulo de incidência ($\cos \theta_i$) quando se aproxima de 1, significa que os raios solares estão praticamente perpendiculares ao plano da superfície, maximizando o aproveitamento de energia proveniente do sol. Como se pode ver pela figura 5.11, o cosseno do ângulo de incidência para a uma superfície orientada a SSE tem o seu ponto máximo atrasado uma hora em relação ao ponto máximo da superfície orientada a S. Isto acontece porque o sol passa aproximadamente uma hora antes pela orientação SSE, atrasando assim o pico de energia obtido e resultando num pico de menor intensidade.

Outra das anomalias registadas nos gráficos pode ser visualizada pelo início da manhã, onde é possível ver que os valores de radiação global “disparam” a partir das 8:30h, onde seria de esperar uma subida gradual dos valores. Este fenómeno pode ser explicado pela orientação a que nasce o sol, que nesta altura do ano não nasce exatamente a Este e uma vez mais a parede que se encontrava a SSE serviu de obstáculo à passagem dos raios solares. Para poder perceber num contexto mais visual e prático o impacto que a parede teve em conjunto com o nascer do sol, recorreu-se mais uma vez às equações do movimento do sol e traçou-se na ferramenta Matlab o azimuth do sol (figura 5.12).

Posteriormente realizou-se um esquema da trajetória diária do sol em conjunto com o azimuth para perceber o impacto nos resultados durante a manhã (figura 5.13).

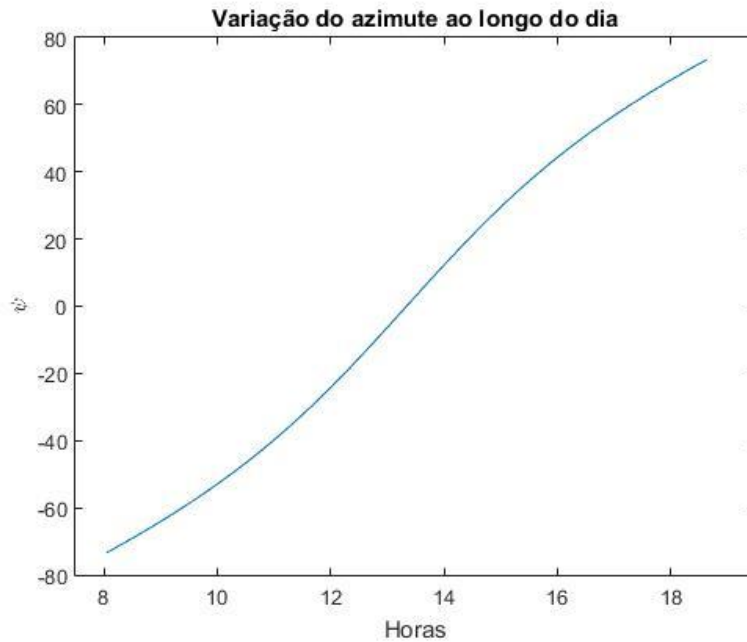


Figura 5.12 - Variação do azimute do sol ao longo do dia da segunda experiência. Este azimute tem como ponto de origem o Sul geográfico, ao contrário do habitual Norte geográfico.

Ao contrário do que acontece nos equinócios, onde o sol nasce exatamente a Este e se põe a Oeste e as horas de luz solar são iguais às horas da noite, os dias em que foram feitas as experiências eram mais curtos. Isto resulta numa menor amplitude do azimute solar em relação aos equinócios. Como se pode ver pela figura 5.12, a amplitude do azimute solar varia entre $[-73,5 \ 73,5]$ ao contrário dos equinócios onde tem uma amplitude de $[-95 \ 95]$. É de notar que o gráfico da variação do azimute solar tem como ponto de origem o Sul geográfico em vez do habitual Norte geográfico.

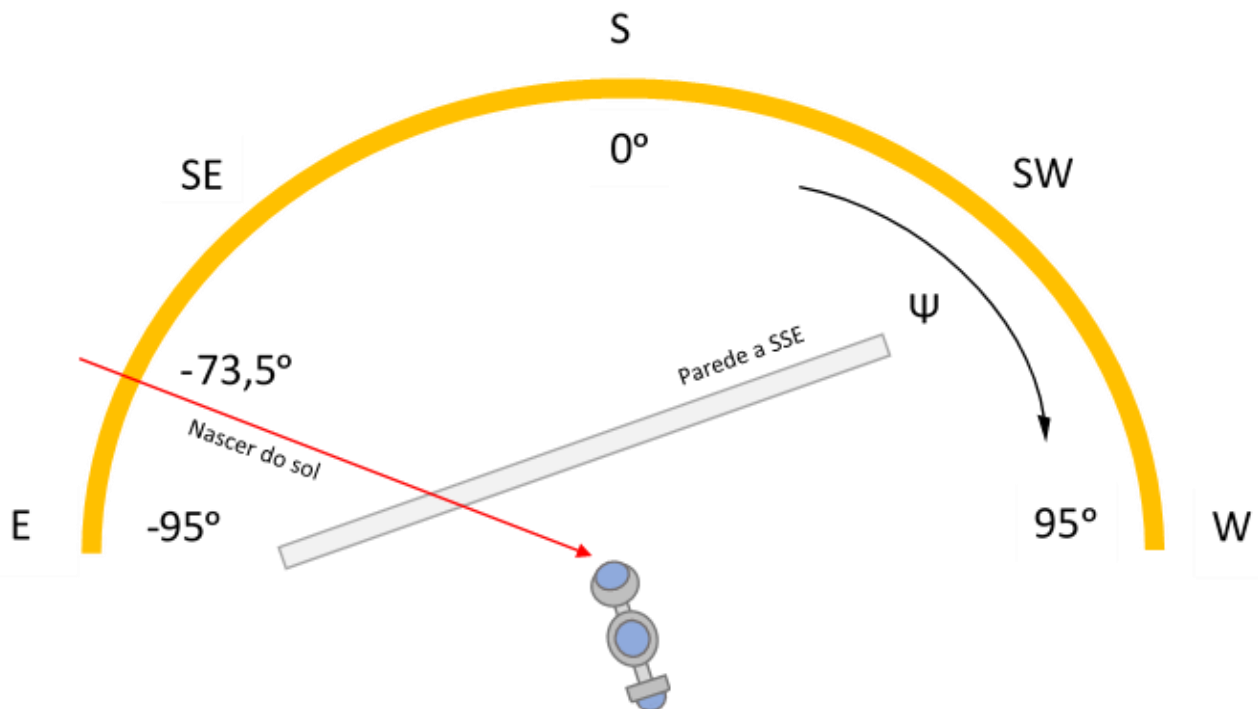


Figura 5.13 – Representação do impacto que a parede a SSE tem durante a manhã em relação ao azimute solar (ψ)

Pela observação da figura 5.13 podemos perceber que mesmo num dia de equinócio, ou seja, quando o sol nasce a Este, a parede teria sempre impacto nas medições. Quanto mais curto o dia, maior será o impacto durante a manhã, uma vez que será preciso maior altura solar para ultrapassar a altura da parede.

5.3. Execução prática

As primeiras duas experiências foram fundamentais para perceber o meio envolvente em que estavam a ser feitas as medições e perceber se o sistema estava a funcionar corretamente. Mas a construção e programação do sistema de medida desenvolvido nesta dissertação tinha como objetivo a execução prática desta terceira experiência.

Para poder medir a radiação proveniente de todo o hemisfério solar, o sistema de medida rodava os três piranómetros SPN1 de maneira a que estes realizassem uma volta completa cada um. Permitindo que os três planos do sistema (0° , 45° e 90°) enviassem dados em simultâneo para o microcomputador Raspberry Pi para posteriormente serem tratados (figura 5.14).

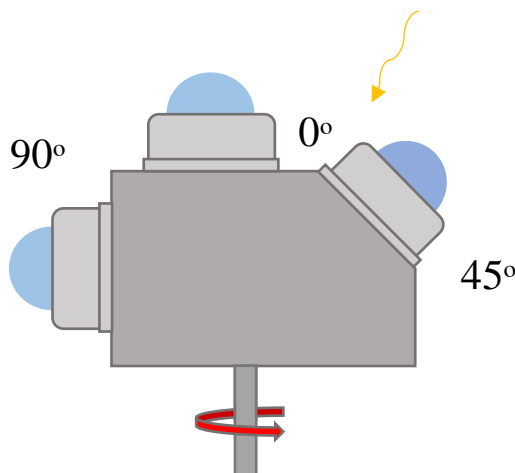


Figura 5.14 – Esquema da terceira experiência onde o sistema de medida roda 360° para medir a radiação em todas as direções

O dia da terceira experiência começou com uma manhã de nevoeiro denso, mas por volta das 10:30h o céu começou a abrir. Durante o meio dia houve uma paragem no seguimento das medições devido a falhas técnicas e voltando a repetir-se ao final do dia.

Como foi dito anteriormente, a programação do sistema teve de ser adaptada de maneira a compensar os passos perdidos ao longo de toda a rotação. O Raspberry Pi foi programado para dar passos de $3,5^\circ$ em $3,5^\circ$ de maneira a rodar 360° , fazendo um total de 104 passos para completar uma volta. A cada passo era registado o ângulo de rotação do piranómetro inclinado a 45° , onde o ponto inicial de leitura começava quando orientado a SSE^d. Sabendo o ângulo correspondente de cada dado, facilmente se associou a direção correspondente em relação ao ponto inicial (figura 5.15).

Para esta experiência, foi preciso ter em conta que o ponto inicial era relativo ao piranómetro inclinado a 45° e os dados dos três piranómetros eram registados ao mesmo tempo. Por isso quando o sistema

^d Tal como na experiência anterior, a terceira experiência também teve como ponto de origem a parede orientada a SSE.

gravava os dados do piranômetro a 90° no ponto inicial, este estava na realidade a ler a radiação proveniente de Norte, uma vez que os dois SPN1 estavam em sentidos opostos. Para o piranômetro a 90° foi então necessário adicionar 180°, forçando o ponto inicial a corresponder a Sul.

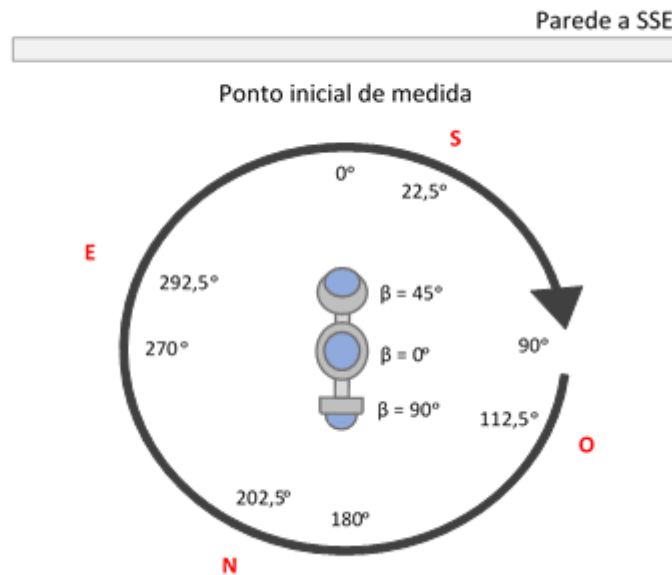


Figura 5.15 - Representação do sistema a começar a medir no ponto inicial e os ângulos dos dados correspondentes aos pontos cardeais

De maneira a obter dados de radiação em todo o hemisfério, foram escolhidos os pontos cardeais de referência: S, O, N e E, ou seja, o ângulo 22,5°, 112,5°, 202,5° e 292,5° respetivamente. Os gráficos obtidos depois do tratamento dos dados adquiridos pelo sistema estão representados nas figuras 5.16, 5.17, 5.18, e 5.19.

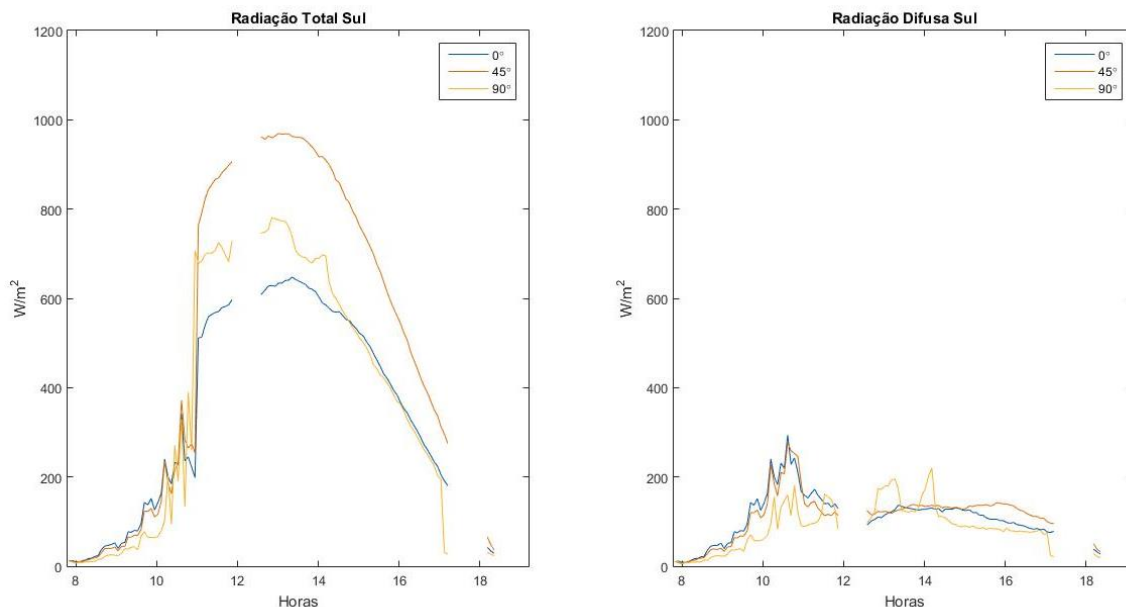


Figura 5.16 - Dados de radiação total e radiação difusa obtidos pelo sistema de medida quando orientado a Sul.

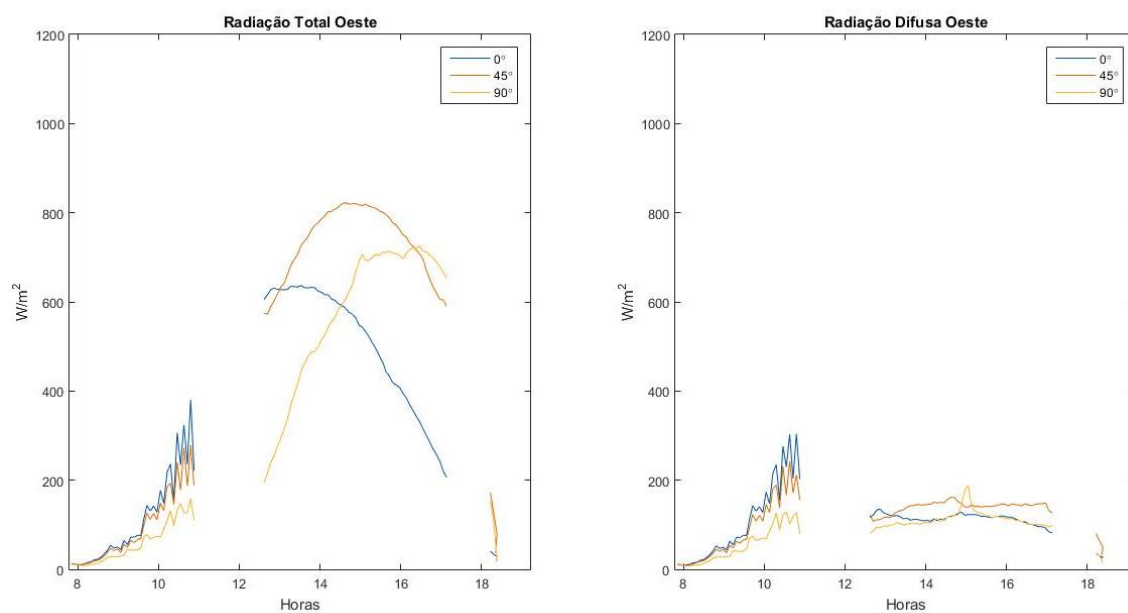


Figura 5.17 - Dados de radiação total e radiação difusa obtidos pelo sistema de medida quando orientado a Oeste.

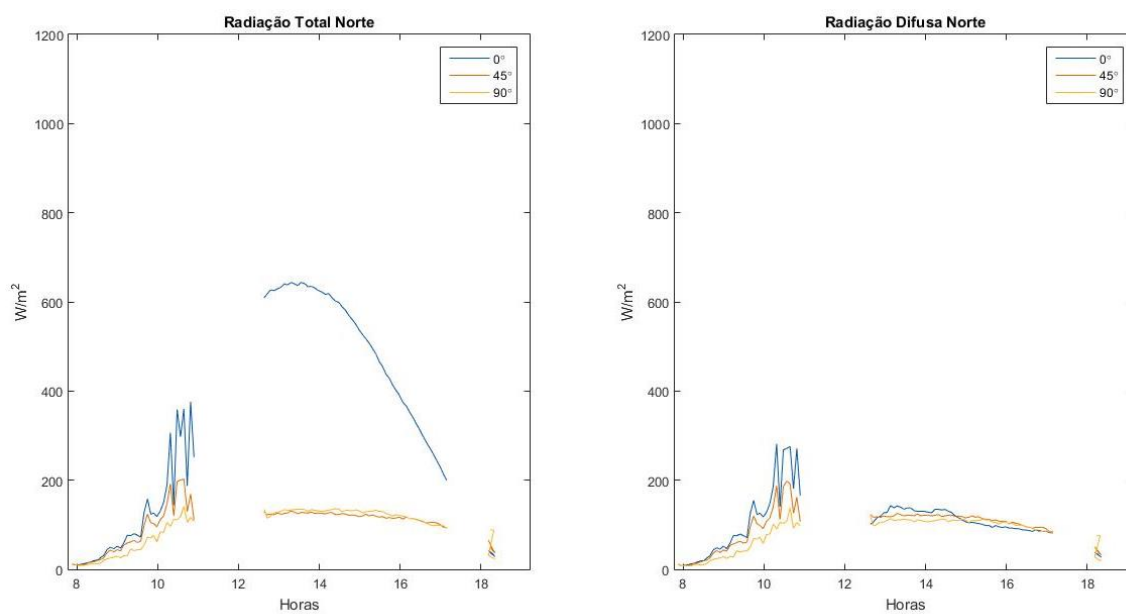


Figura 5.18 - Dados de radiação total e radiação difusa obtidos pelo sistema de medida quando orientado a Norte.

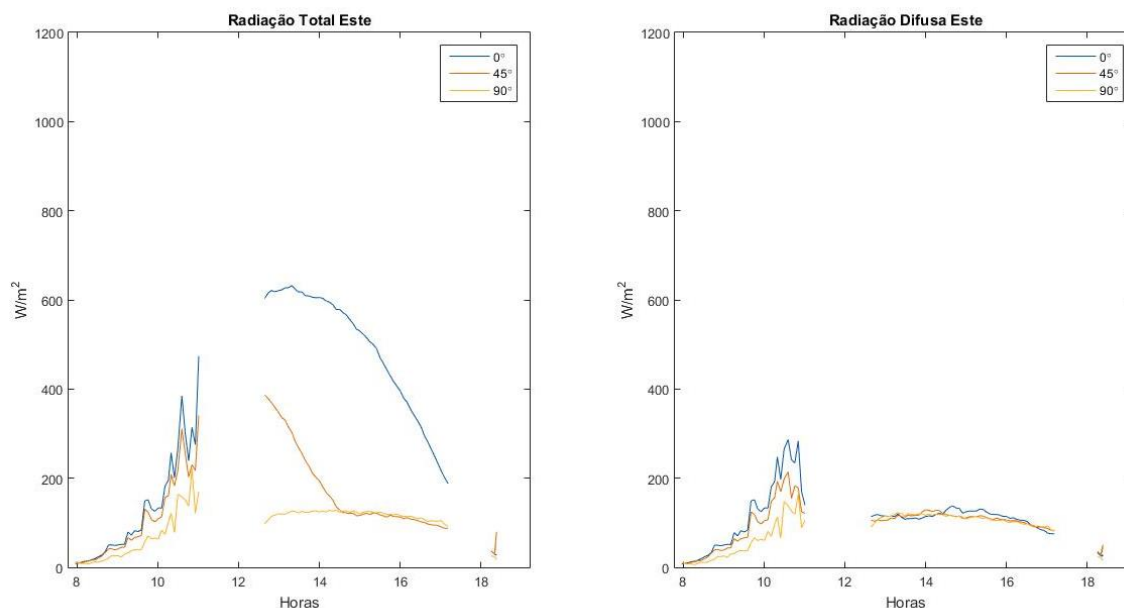


Figura 5.19 - Dados de radiação total e radiação difusa obtidos pelo sistema de medida quando orientado a Este.

Antes de verificar os resultados obtidos pelo sistema, é preciso ter em conta que antes da primeira paragem de medição, o sistema começou a perder passos. Isto deveu-se à baixa qualidade da roda dentada que suportava o movimento do motor, que ao longo de múltiplos testes de funcionamento se foi desgastando. Apesar de ser irrelevante para o piranómetro a 0° , este problema teve um impacto relevante para os outros piranómetros. Foi por isso necessário ajustar a roda dentada, motivo pelo qual houve a primeira paragem. Em relação à última paragem, não existe uma explicação concreta para a sua causa e mostra que o sistema de medida deve ser melhorado.

A perda de passos não teve grande impacto no início da manhã, uma vez que o dia começou com nevoeiro denso, existindo apenas radiação difusa isotrópica. É por isso que os resultados obtidos durante o início da manhã são semelhantes entre a GHI e a DHI, existindo nesta última um pico em relação ao resto do dia, que teve céu limpo. Mas quando o nevoeiro passou, a perda de passos começou a afetar os resultados.

Como o sistema estava programado para voltar sempre ao início, os primeiros resultados obtidos, ou seja, dados de radiação provenientes de Sul, não foram afetados pela perda de passos (figura 5.16). Já nas outras direções teve interferência. Os dados obtidos na direção Oeste antes do momento da primeira paragem não foram incluídos no gráfico, uma vez que se sentiu uma subida muito acentuada da radiação total nos piranómetros a 45° e 90° , quando esta deveria ser mais suave. Isto deve-se ao facto destes piranómetros terem ficado mais atrasados em relação ao Oeste, direcionados ligeiramente para Sudoeste (SW), e captarem maior radiação à medida que o sol subia na sua trajetória.

O mesmo aconteceu para os dados obtidos na direção Este, só que neste caso em vez de ter uma descida gradual da GHI para os piranómetros inclinados, existiu uma descida abrupta. Isto aconteceu porque à medida que o sol subia na sua trajetória e seguia para Sul, o sistema quando estava programado para passar em Este, estava na realidade a passar a Nordeste (NE), ficando cada vez mais de costas para o sol.

Para os dados obtidos na direção Norte, o facto de a perda de passos ser durante a manhã fez com que estes não fossem afetados. Uma vez que os piranómetros inclinados ficavam direcionados para Noroeste (NW), exatamente de costas para o sol durante a manhã.

Como os dados antes da primeira paragem para as direções Oeste, Este e Norte não estavam corretos, optou-se por se retirar dos gráficos apresentados (figuras 5.17, 5.18 e 5.19).

Depois de resolvida a questão da roda dentada, a experiência seguiu sem problemas até ao final do dia até à paragem súbita do sistema. Apesar desta paragem ser ao final do dia, afetou a continuidade dos gráficos mais uma vez.

Em termos de GHI, quando o sistema estava orientado a Sul captou valores bastante elevados, especialmente para o piranómetro com inclinação de 45° que no meio dia solar mediu quase 1000 W/m^2 (figura 5.16). Este valor era esperado uma vez que nesta altura do ano o sol está mais baixo e o ângulo ótimo de inclinação está perto de 45° . Através da figura 5.20.a, podemos ver que o cosseno do ângulo incidente para as duas superfícies inclinadas é elevado, aproximando-se de 1 no caso de uma superfície a 45° .

Quando o sistema estava orientado a Oeste, este comportou-se como esperado. Observando-se mais cedo o pico de GHI do piranómetro a 45° do que o de 90° (figura 5.17). A Este o nevoeiro de manhã impediu que se visse o pico de GHI, mas depois de este passar e resolvida a questão da roda dentada, é possível ver que no piranómetro a 45° existe uma descida gradual desta radiação a meio do dia (figura 5.18). Aqui percebe-se que o sol se está a afastar da superfície a Este, indo em direção a Sul, diminuindo o cosseno do ângulo de incidência na superfície (figura 5.20.d).

Quando o sistema estava orientado a Norte, é possível perceber que ambos os piranómetros inclinados não receberam GHI, uma vez que nesta direção o sol está sempre na direção oposta no hemisfério Norte (figura 5.20.c). Por isso apenas registou radiação difusa isotrópica, como se pode ver pela semelhança entre os dois gráficos de radiação total e difusa (figura 5.19).

Para o piranómetro que estava na horizontal, não houve praticamente diferença de resultados em todas as direções, já que este plano não sofre qualquer desvio de direção quando o sistema está a rodar, não alterando o ângulo de incidência no piranómetro.

Observando os gráficos de DHI, que é o principal objetivo desta dissertação, podemos perceber que nas direções com menor exposição ao sol (Norte e Este) a DHI tem gráficos mais “suaves”. Enquanto que nas outras direções com maior exposição (Sul e Oeste), existem picos de DHI quando o céu está limpo. Uma possível explicação para este fenómeno é a variação do ângulo de abertura dos piranómetros SPN1 quando estes estão a rodar, que captam maior CSI nas suas medições.

No início do dia quando o céu estava coberto, é possível observar que os dados de DHI da superfície a 90° são inferiores aos da superfície a 0° , uma vez que esta superfície vê metade do ângulo sólido do céu. O mesmo para a superfície a 45° , que tem maiores resultados que a de 90° , mas menores que a de 0° , uma vez que vê $\frac{3}{4}$ do ângulo sólido do céu.

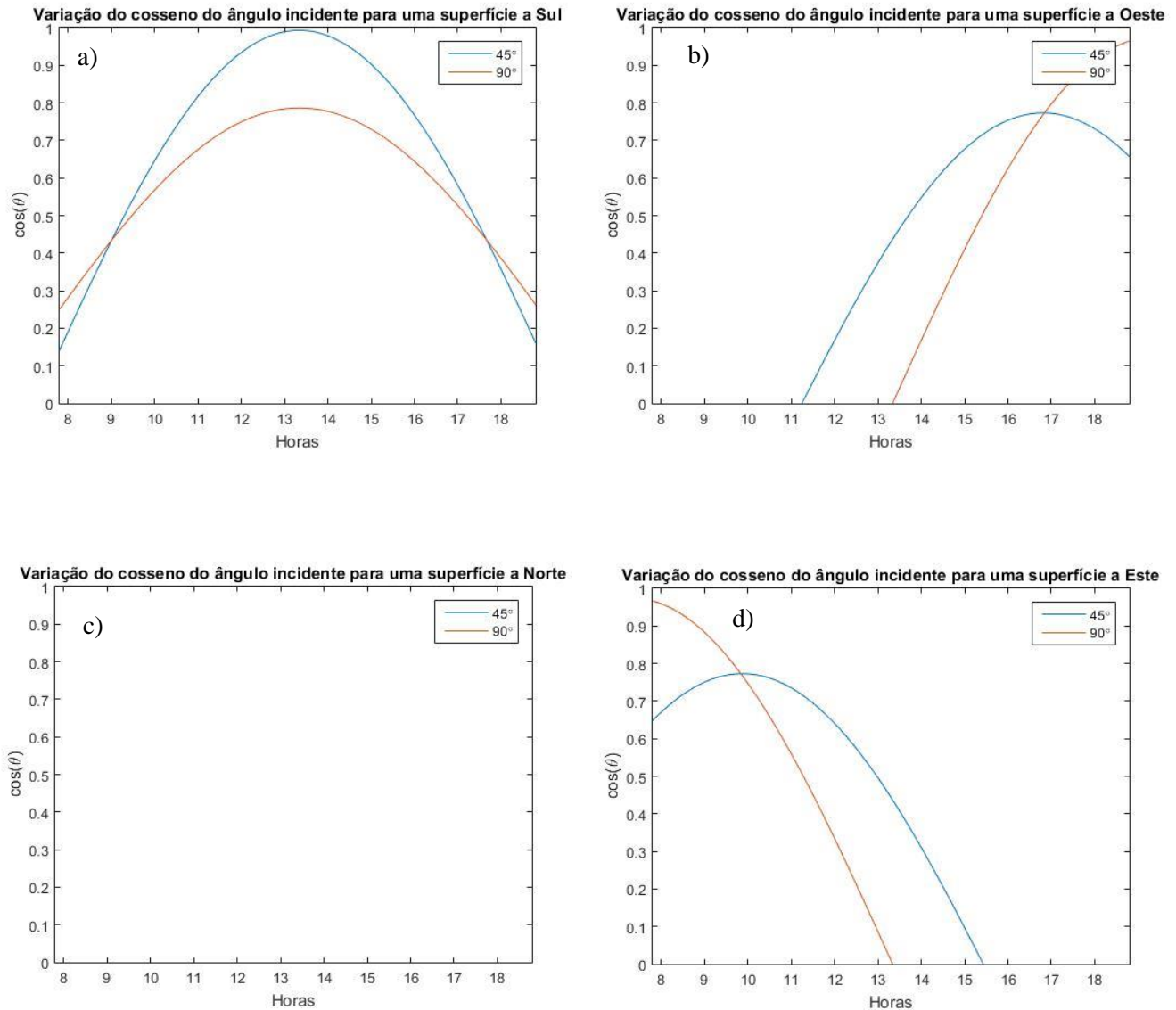


Figura 5.20 - Variação do cosseno do ângulo de incidência para os quatro pontos cardeais: **a)** Sul **b)** Oeste **c)** Norte e **d)** Este.

De maneira a avaliar a radiação total e difusa em todas as direções durante certas partes do dia, como o nevoeiro de manhã, o meio dia solar e o final do dia, foram retirados dados em que o sistema fazia uma volta completa em certas horas, tendo em conta que cada volta demora cerca de 5 minutos a ser completada. Com estes dados foi possível realizar gráficos de radar usando como ponto de referência o sul geográfico, sendo assim possível avaliar qualitativamente como os obstáculos interferiam com os resultados e como a radiação solar se distribui ao longo de todo o hemisfério. É possível observar estes gráficos através da figura 5.21.

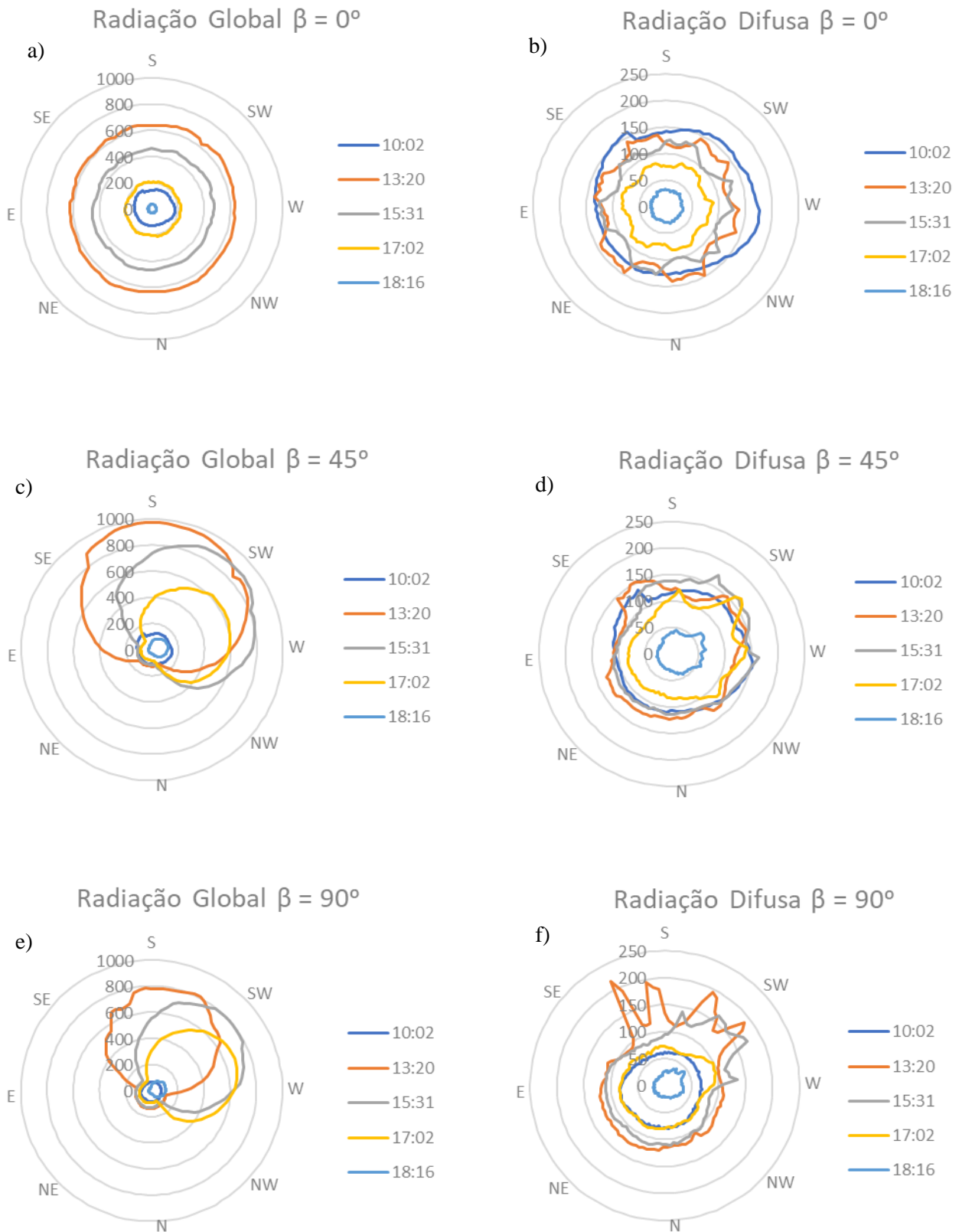


Figura 5.21 – Gráficos de radar de radiação global e difusa das três inclinações do sistema de medida em W/m^2 : a) GHI $\beta = 0^\circ$ b) DHI $\beta = 0^\circ$ c) GHI $\beta = 45^\circ$ d) DHI $\beta = 45^\circ$ e) GHI $\beta = 90^\circ$ f) DHI $\beta = 90^\circ$

É preciso ter em consideração que cada volta do sistema demora cerca de 5 minutos a ser completada. Ou seja, os gráficos apresentados na figura 5.21 não representam a radiação instantânea proveniente de todas as direções, mas sim o que o sistema leu ao longo de cinco minutos. Apesar deste tempo ser curto para ocorrer um grande desvio na trajetória do sol, não deixa de ser relevante.

Como se pode ver pelo gráfico do piranómetro instalado na horizontal (figura 5.21.a), os valores de GHI obtidos em cada parte do dia são praticamente uniformes ao longo de todas as direções. Isto acontece porque o piranómetro SPN1 é relativamente insensível à rotação azimutal quando lê GHI na horizontal. Já no piranómetro inclinado a 45° (figura 5.21.c), pode-se observar os picos de GHI na direção em que o sol está a essa hora. À medida que o sol se põe, observa-se também o desvanecer dos picos de radiação.

No piranómetro instalado a 90° (figura 5.21.e) é possível observar que os valores de GHI não se comportam como nos outros piranómetros, não se verificando um pico de radiação. Isto deve-se ao impacto que a parede que se encontra aproximadamente a sul tem sobre o piranómetro mais inclinado, não deixando que parte da radiação incida sobre ele.

Observando os valores de DHI, é possível observar que durante a manhã estes são muito semelhantes à GHI, já que durante a manhã o céu estava coberto. Já os valores de DHI à tarde apresentam oscilações com 6 dobras ao longo da rotação quando o céu estava limpo. Isto deve-se provavelmente à quantidade de radiação circumsolar obtida pelos sensores, que é referida como uma fonte de incerteza segundo Badosa [6], indicando uma maior componente circumsolar com uma maior variação de DHI. Esta relação parece variar também com o ângulo zenital, que quanto maior, maior será a variação de DHI.

A radiação circumsolar provém da zona entre o centro do disco solar (onde está a DNI) e a sua periferia, reduzindo a sua intensidade com o afastamento do centro do disco até ao valor médio do céu difuso isotrópico. A forma desta curva depende fortemente da densidade de aerossóis e vapor de água presentes na atmosfera.

O ponto em que a radiação é considerada DNI ou DHI é por vezes arbitrário, sendo por norma separados a partir de $2,5^\circ$ de meio ângulo de abertura desde o centro do sol que é o valor base recomendado para pireliómetros segundo o WMO. [29] Como foi dito anteriormente, o piranómetro SPN1 mede a DNI através da diferença entre o valor máximo lido entre os sensores (que é o sensor totalmente exposto ao sol) e o valor mínimo (sensor totalmente coberto).

Segundo Badosa, o meio ângulo de abertura do SPN1 varia consoante a sua posição para o sol, mas é pelo menos $\pm 5^\circ$, o que é superior ao valor base estabelecido para pireliómetros ($\pm 2,5^\circ$). Isto indica que o SPN1 vai medir DNI com uma boa parte de radiação circumsolar incluída, sobrevalorizando-a em relação a valores obtidos por um pireliómetro. O que por sua vez vai subvalorizar os resultados obtidos de DHI.

Para poder perceber o efeito que a componente circumsolar tinha nos valores obtidos de DHI, Badosa realizou uma experiência onde comparava um piranómetro com um disco de sombra de $\pm 6,5^\circ$ e um de $\pm 2,5^\circ$. A diferença obtida entre estas medições, ou seja, a diferença entre os meios ângulos $2,5^\circ$ e $6,5^\circ$, resultava da componente circumsolar. Comparando depois com os resultados obtidos pelo SPN1, notou que para cada 1 W m^{-2} de radiação circumsolar medida, resultou em -1 W m^{-2} de DHI. Notou também uma sistemática subvalorização da DHI a cada 60° de periodicidade azimutal em orientações onde o sensor com menor valor dos sete sensores estava exatamente atrás de uma “perna” da máscara de sombra. Isto acontece porque nesta situação, o ângulo de abertura do SPN1 é maior, resultando numa sobrevalorização do DNI e por sua vez subvalorização do DHI. Este efeito é menos relevante para dias

de céu muito limpo ou nublado, onde a componente circunsolar é pequena e a radiação difusa mais isotrópica.

As oscilações observadas nos gráficos de radar de DHI quando o céu estava limpo são, portanto, subvalorizações de DHI, uma vez que a componente circunsolar está a ser incluída na DNI quando o ângulo de abertura é maior e normalizada quando o ângulo de abertura é menor. Resultando em seis subvalorizações ao longo da rotação para o piranómetro na horizontal (figura 5.21.b), que é quando os seis sensores em hexágono estão exatamente atrás das “pernas” da máscara de sombra (ver pág. 16). Já durante a manhã não existiu este efeito, uma vez que o céu estava nublado e apenas incidia radiação difusa isotrópica.

Apesar de estas medições terem sido feitas em dia de céu limpo, é de notar que foram feitas em plena cidade de Lisboa, que pela grande concentração de automóveis e pela sua proximidade ao mar tem uma elevada concentração de aerossóis [30] e vapor de água, potenciando o efeito da componente circunsolar nos resultados obtidos de DHI.

Analisando os gráficos de DHI dos piranómetros inclinados, é possível perceber que ao longo da rotação estes registaram picos de radiação quando os piranómetros passavam pelo sol (figuras 5.21.d e 5.21.f), ou seja, quando foram expostos à radiação circunsolar. Nestas condições, o meio ângulo de abertura é maior e incide menor radiação difusa isotrópica devido a estes planos “verem” menos céu, o que aumenta o efeito da componente nestas medições.

De modo a perceber o efeito que a CSI tem nos piranómetros inclinados, calculou-se a distribuição de DHI em cada direção em relação à DHI total obtida pelo piranómetro na horizontal. Este cálculo foi feito para três pontos do dia: 10h em condições de nevoeiro, 13:20 hora do meio dia solar e 17h quando o sol estava perto do crepúsculo.

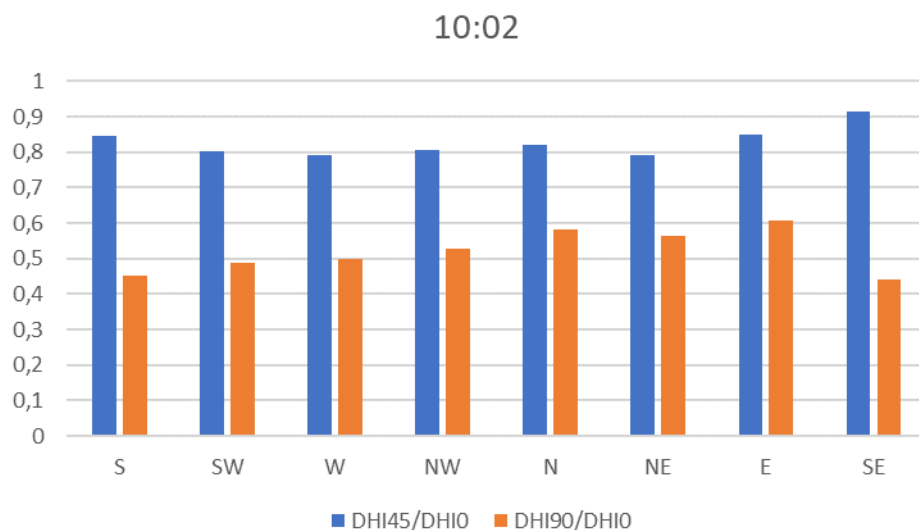


Figura 5.22 – Distribuição de DHI por direção em relação à DHI obtida na horizontal às 10:02h

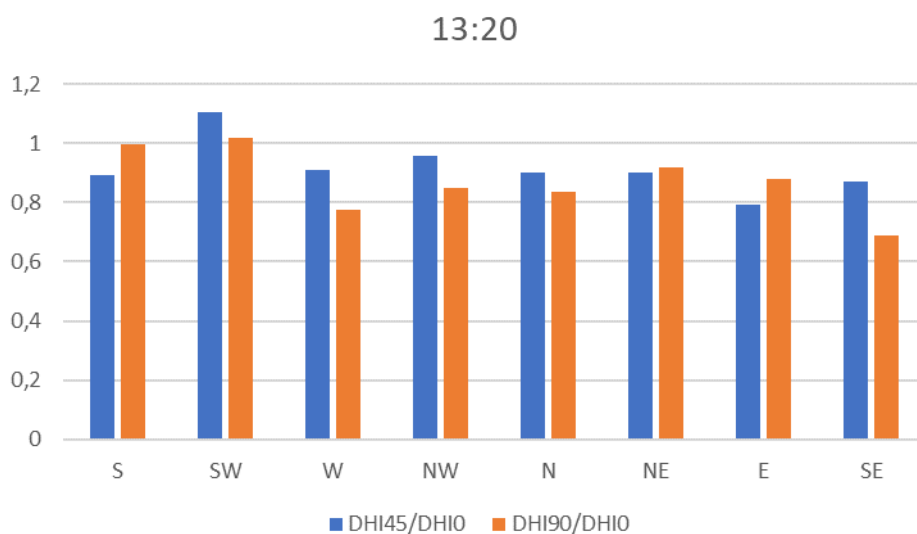


Figura 5.23 - Distribuição de DHI por direção em relação à DHI obtida na horizontal à 13:20h

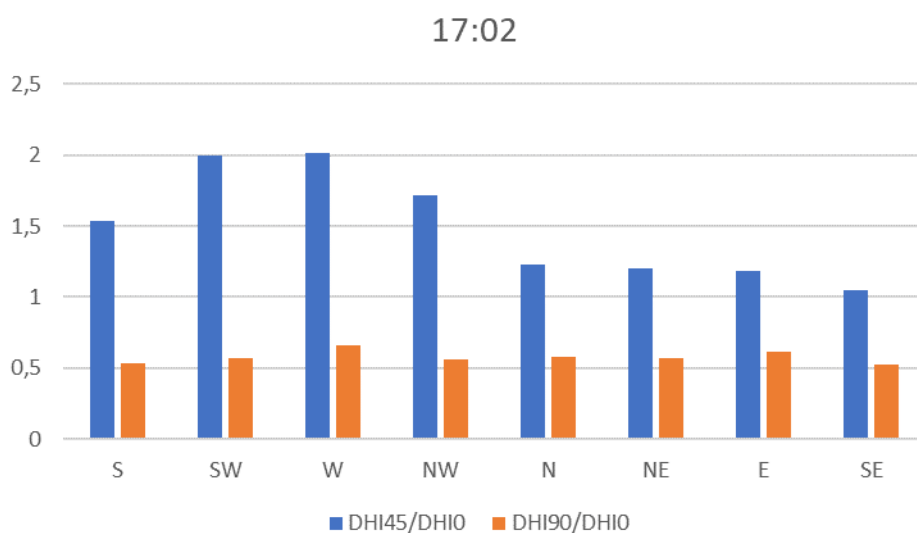


Figura 5.24 - Distribuição de DHI por direção em relação à DHI obtida na horizontal às 17:02h

Observando a figura 5.22 é possível perceber que durante a manhã em condições de nevoeiro, apenas existia radiação difusa isotrópica. Esta condição é facilmente observável através dos valores de distribuição do piranómetro a 45°, que por não “verem” todo o céu visível, mantêm-se constantes em 0,8. Já os valores de distribuição do piranómetro a 90° mantêm-se em média a 0,5 por apenas captarem metade do céu visível.

Os valores da figura 5.23 já não representam uma situação com condições de radiação difusa isotrópica, pois os valores de distribuição do piranómetro a 45° e 90° variam um pouco em todas as direções e são mais elevados nas direções a Sul, exatamente onde se encontrava o sol. O facto de nestas direções a distribuição ser maior que 1 indica que existe influência da CSI nos dados adquiridos, uma vez que a

CSI tem a mesma direção e sentido que os raios solares, que para estas direções e inclinações faz um ângulo ótimo e aumenta o seu aproveitamento. Como podemos ver para a direção a Sul, a distribuição de DHI foi superior para a superfície a 90° do que para a de 45° , resultado da variação do ângulo de abertura do SPN1 ao longo da rotação, que faz variar a quantidade de CSI incluída na DHI.

Na figura 5.24 é possível observar que para as direções a Oeste, a distribuição de DHI é muito superior ao resto das direções para o piranómetro a 45° , aproximando-se de dois. Isto deve-se provavelmente ao facto de nesta direção e inclinação, o meio ângulo de abertura ser inferior ao do piranómetro a 90° , incluindo maior fração de CSI nos dados de DHI e também o ângulo de incidência ser bastante elevado, aumentando os valores obtidos de DHI.

Capítulo 6 – Conclusões e Desenvolvimentos futuros

O estudo apresentado neste trabalho permitiu o estudo da distribuição de radiação difusa em todas as direções do hemisfério. Em todo o processo da construção deste sistema de medida, o foco sempre esteve orientado para a medição da DHI e compreender como esta se distribui ao longo de todo o hemisfério e ao longo do dia. Podemos afirmar que o sistema desenvolvido cumpriu este objectivo da tese. No entanto o sistema apresenta algumas limitações, como demorar 5 minutos para completar uma volta, não medindo a radiação instantânea em todas as direções, ou subvalorizar os valores de DHI por não incluir a componente circunsolar nos seus cálculos, resultado de uma limitação dos piranómetros SPN1 quando o seu ângulo de abertura é maior.

Os resultados das medições sugerem que o sistema mede valores tanto de DHI como de GHI com uma boa precisão para uma superfície na horizontal, se comparado com um seguidor solar equipado com um piranómetro e um pireliómetro de alta qualidade, apresentando valores de correlação linear de 99% e 79% para a GHI e DHI, respectivamente.

Analisando os dados de DHI, é de notar que quando o sistema operou em condições de céu nublado, estes mantinham-se praticamente constantes e sem variação com o azimuth, indicando apenas a presença de radiação difusa isotrópica em todas as inclinações. Em condições de céu limpo, o sistema mediu praticamente radiação difusa isotrópica nas direções Norte e Este, mas nas direções à passagem do sol, o sistema mediu picos de DHI, resultado da radiação difusa circunsolar nas imediações do sol. Este efeito é tanto maior, quanto maior o cosseno do ângulo de incidência.

Apesar de existirem outras componentes da radiação solar que poderiam afetar os resultados, como a HB e a GRI, é difícil dizer com certeza se afetam os resultados, uma vez que são difíceis de ser observadas.

Os obstáculos nas proximidades do sistema de medida refletem-se com evidência nos resultados obtidos, como a parede a Sul, que afetava os resultados dos piranómetros inclinados, principalmente o piranómetro a 90° . É possível observar este impacto qualitativamente mas não quantitativamente, uma vez que não se dispunha de dados de radiação obtidos por outros piranómetros com inclinações de 45° e 90° , em zonas sem obstáculos, de maneira a se poder comparar. Os outros obstáculos, como o edifício C6 e o edifício C8 não parecem ter impacto nos resultados obtidos.

A acrescentar a este projeto, existe uma série de melhoramentos e medições que seriam importantes para a obtenção de melhores resultados. O facto de este sistema de medida ter sido construído com materiais de baixo custo, fez com que não fosse possível de o testar em condições mais adversas. Seria por isso

interessante montar este sistema de medida numa caixa metálica bem isolada de maneira a não entrar a água da chuva.

Outro melhoramento seria a instalação de um motor com maior binário de maneira a diminuir o tempo necessário para completar uma volta. Esse processo começava por se calcular o torque necessário para fazer girar os três piranómetros e depois instalar um motor com essas características. Outro método que poderia ser feito seria calcular e construir um sistema de rodas dentadas à medida de maneira a desmultiplicar a força do motor já existente de maneira mais precisa. Também seria interessante saber a frequência natural do motor e através da sua programação fugir à ressonância. Visto que neste sistema foi evitada através de tentativa e erro.

Seria interessante a aplicação de vários outros melhoramentos, como uma melhor passagem dos fios que ligam os piranómetros ao Raspberry Pi de maneira a simplificar o funcionamento do sistema. O suporte que segura os três piranómetros poderia ser feito em fibra de carbono com alguns furos, de maneira a diminuir o peso do objeto de rotação e deixar passar o vento. Podia ser também adicionado um segundo *switch* no final da rotação de maneira a aumentar a precisão do sistema.

Em termos de estudos adicionais, deveriam fazer-se comparações com dados obtidos por outros sistemas de medição. Nomeadamente comparar os dados obtidos pelos piranómetros inclinados desta dissertação com outros piranómetros inclinados de alta qualidade, já que apenas se comparou os dados de radiação na horizontal. Seria também importante comparar os dados obtidos pelos piranómetros inclinados em todos os pontos cardeais.

Seria interessante fazer medições ao longo de um ano, uma vez que este projeto se baseia apenas em medições de um dia. Para tal, seria necessário melhorar o sistema de maneira a suportar as condições adversas dos meses de chuva. As rodas dentadas que desmultiplicam a força do motor, teriam de ser de um material resistente, uma vez que as que foram utilizadas neste projeto não tinham grande durabilidade, não sendo possível fazer um grande número de medições.

O facto de o local das medições ser na cidade de Lisboa, tornou expectável que houvesse uma grande influência da CSI nos resultados obtidos de DHI, uma vez que Lisboa é à beira mar e é uma cidade com muitos automóveis. Seria por isso importante fazer medições com este sistema de medida noutras locais, que fossem afastados de grandes massas de água e longe de grandes cidades, para evitar uma grande concentração de vapor de água e poluentes na atmosfera.

Por fim, seria interessante calcular quantitativamente a CSI através da diferença de valores dos sensores individuais dos piranómetros SPN1. Para isso teria de se comparar minuciosamente todos os valores mínimos dos sensores do SPN1 (que correspondem à DHI) e ver como eles se comportam à passagem do sol.

Referências Bibliográficas

- [1] R. Perez, “Renewable Energies: Our Solar Future,” *Daylight Archit.*, no. 12, pp. 67–73, 2009.
- [2] K. Ya. Kondrat’Yev, “6 Diffuse Radiation of the Atmosphere,” *Int. Geophys.*, vol. 12, pp. 363–410, Jan. 1969.
- [3] M. Gunther, “Solar Radiation,” *Adv. CSP Teach. Mater.*, pp. 16–21, 2011.
- [4] C. F. B. and D. R. Huffman, “Absorption and Scattering by an Arbitrary Particle,” in *Absorption and scattering of light by small particles*, John and W. & Sons, Eds. New York, 1983, pp. 57–81.
- [5] J. C. Peiper and K. S. Pitzer, “Techniques For Measuring Circumsolar Radiation,” *Phys. Rev. Part. Phys. Pe*, no. 0370-2693, 2011.
- [6] J. Badosa *et al.*, “Solar irradiances measured using SPN1 radiometers: Uncertainties and clues for development,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 7, no. 12, pp. 4267–4283, 2014.
- [7] J. a. Duffie, W. a. Beckman, and W. M. Worek, “Solar Engineering of Thermal Processes, 4nd ed.,” in *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 116, 2003, pp. 84–96.
- [8] B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, “The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation,” *Sol. Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 1–19, Jul. 1960.
- [9] J. E. Hay, “Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces,” *Sol. Energy*, vol. 23, no. 4, pp. 301–307, Jan. 1979.
- [10] R. C. Temps and K. L. Coulson, “Solar radiation incident upon slopes of different orientations,” *Sol. Energy*, vol. 19, no. 2, pp. 179–184, Jan. 1977.
- [11] R. Perez, R. Seals, P. Ineichen, R. Stewart, and D. Menicucci, “A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces,” *Sol. Energy*, vol. 39, no. 3, pp. 221–231, Jan. 1987.
- [12] D. D. E. E. Geográfica, G. E. Energia, J. Portela, and M. Baptista, “Distribuição Angular da Radiação Solar : Aplicação do Modelo de Perez,” 2016.
- [13] P. Blanc *et al.*, “Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue,” *Sol. Energy*, vol. 110, pp. 561–577, Dec. 2014.
- [14] Kipp & Zonen, “SMP 6 First Class Pyranometer.” [Online]. Available: <http://www.kippzonen.com/Product/358/SMP6-Pyranometer#.WuM2tIjwbIU>. [Accessed: 27-Jan-2018].
- [15] Hukseflux, “DR02 First Class Pyrheliometer.” [Online]. Available: https://www.hukseflux.com/product/dr02-pyrheliometer?gclid=EAIaIQobChMI-M3-ydna2gIVFjobCh2GDgMuEAAYASAAEgKvMvD_BwE. [Accessed: 27-Jan-2018].
- [16] Frank Vignola; Joseph Michalsky; Thomas Stoffel, *Solar and Infrared Radiation Measurements*. 2017.
- [17] Kipp & Zonen, “The Working Principle of a Thermopile Pyranometer,” 2015. [Online]. Available: <http://www.kippzonen.com/News/572/The-Working-Principle-of-a-Thermopile-Pyranometer#>.
- [18] TE Connectivity, “Thermopile Infrared Sensors.” [Online]. Available: <http://www.te.com/us-en/product-G-TPCO-033.html?q=&d=141567&type=products&samples=N>. [Accessed: 27-Jan-2018].

- [19] M. de Simón-Martín, C. Alonso-Tristán, D. González-Peña, and M. Díez-Mediavilla, “New device for the simultaneous measurement of diffuse solar irradiance on several azimuth and tilting angles,” *Sol. Energy*, vol. 119, pp. 370–382, 2015.
- [20] J. J. Michalsky, R. Perez, R. Stewart, B. A. LeBaron, and L. Harrison, “Design and development of a rotating shadowband radiometer solar radiation/daylight network,” *Sol. Energy*, vol. 41, no. 6, pp. 577–581, 1988.
- [21] Kipp & Zonen, “CM121B/C Shadow Ring.” [Online]. Available: <http://www.kippzonen.com/Product/42/CM121B-C-Shadow-Ring#.WvHaXYgvzIU>. [Accessed: 10-Feb-2018].
- [22] Campbell Scientific, “RSR2-KIT - Rotating Shadowband Radiometer.” [Online]. Available: <https://www.campbellsci.com.au/rsr2-kit>. [Accessed: 10-Feb-2018].
- [23] Kipp & Zonen, “SOLYS2 Sun Tracker.” [Online]. Available: <http://www.kippzonen.com/Product/20/SOLYS2-Sun-Tracker#.WvRajYgvzIU>. [Accessed: 10-Feb-2018].
- [24] N. Webb, “SPN1 Technical Fact Sheet v1.2d,” pp. 5–6, 2014.
- [25] E. Andersen, K. P. Nielsen, J. Dragsted, and S. Furbo, “Measurements of the Angular Distribution of Diffuse Irradiance,” *Energy Procedia*, vol. 70, no. Dmi, pp. 729–736, 2015.
- [26] RS Pro, “Data sheet Stepper Motors,” vol. 81, no. 3, pp. 1–16, 2007.
- [27] EKO, “MS-802 Pyranometer,” pp. 1–3.
- [28] T. Specifications, “MS-57 Pyrheliometer,” pp. 9059–9060.
- [29] N. Ohkawara, H. Tatsumi, O. Ijima, H. Koide, and S. Yamada, “Third WMO Regional Pyrheliometer Comparison of RA II (Tokyo , 23 January – 3 February 2012),” no. 113, 2012.
- [30] S. M. Almeida, C. A. Pio, M. C. Freitas, M. A. Reis, and M. A. Trancoso, “Contribuição da circulação automóvel para o aerossol atmosférico na zona Norte de Lisboa,” 2001.
- [31] Delta-T Devices Ltd, *User Manual for the Sunshine Pyranometer type SPN1*. 2016.

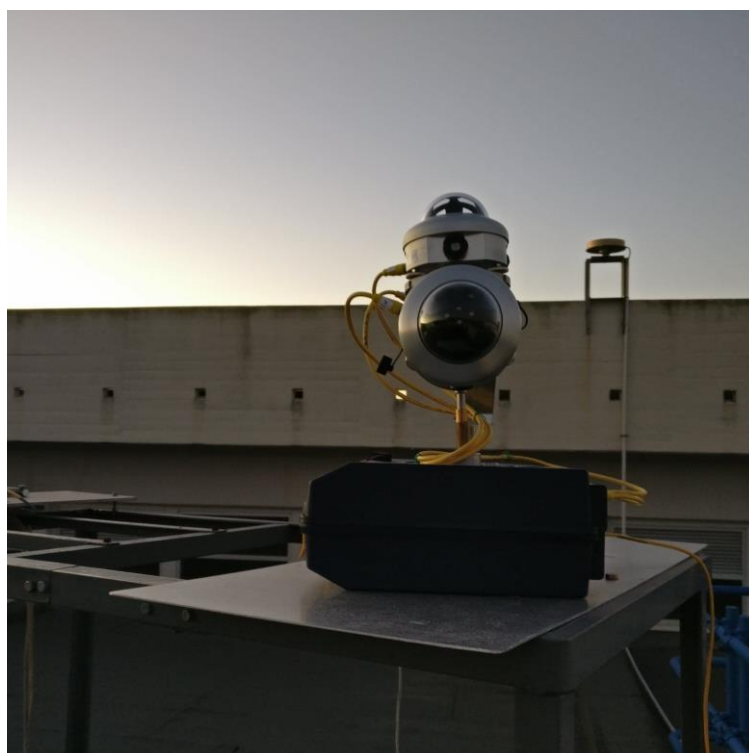
Anexos

Imagens das medições:

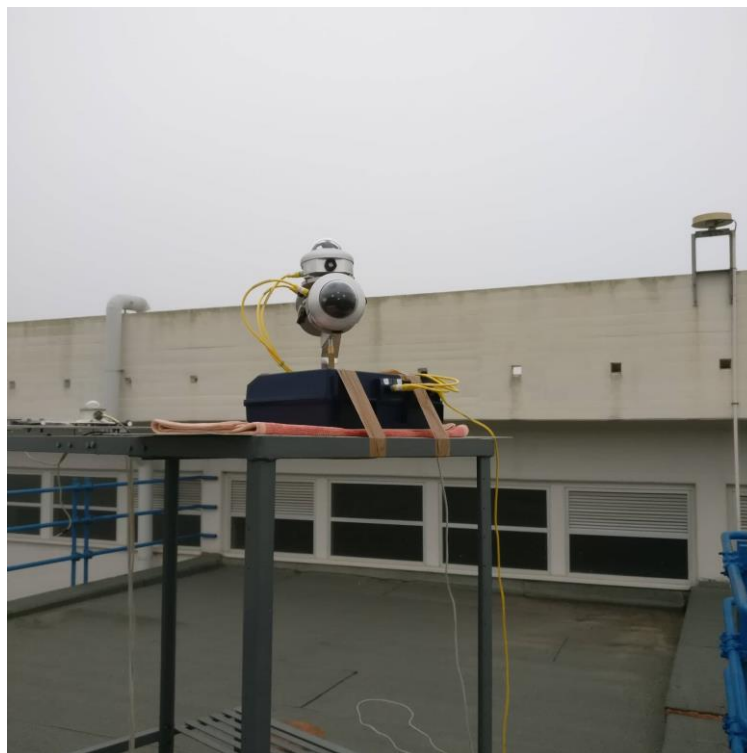
1ª Experiência



2ª Experiência




3ª Experiência



Comparação das características do SPN1 com as parâmetros da WMO e ISO. [24]

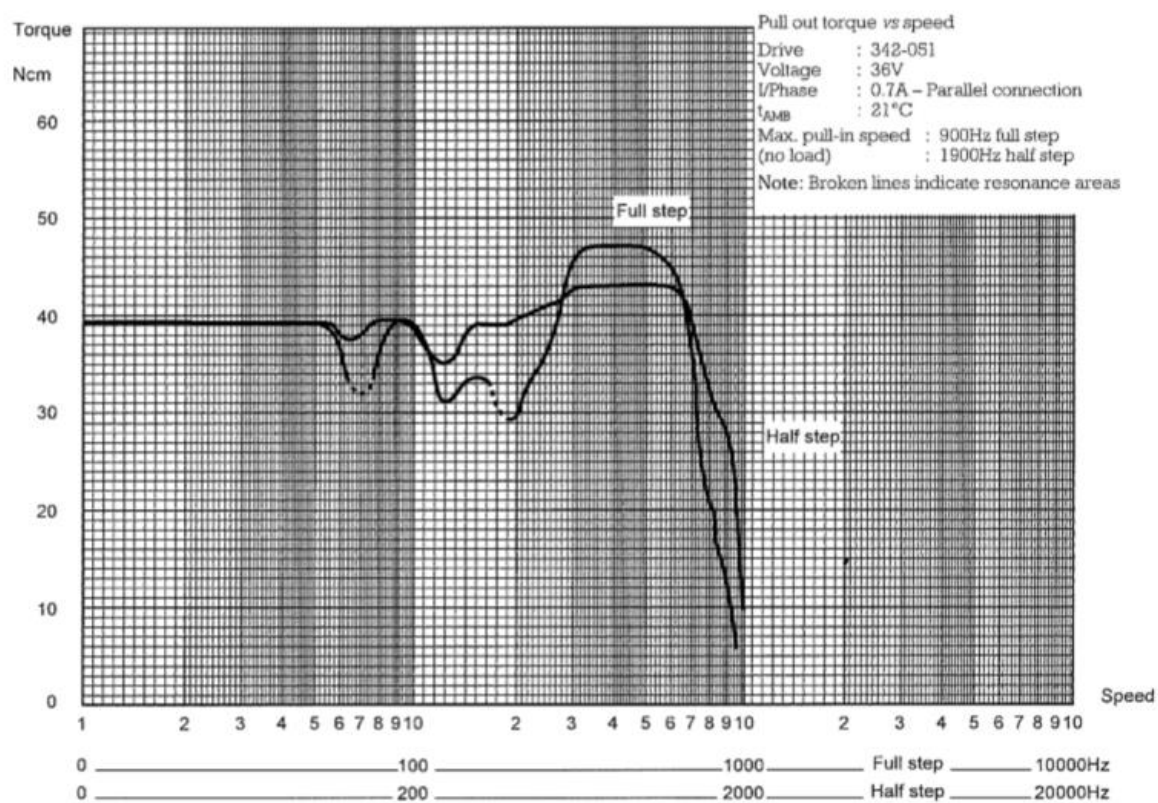
Comparison of SPN1 with WMO and ISO pyranometer standards

		ISO: Secondary Standard	ISO: First Class		Notes
		WMO: High Quality	WMO: Good Quality		
Response time	ISO & WMO	< 15 s	< 30 s	0.1 s	To 95% of final value (Actual response time is 100ms)
Zero off-set response:	ISO & WMO	7 W/m ²	15 W/m ²	<3 W/m ²	To 200 W/m ² net radiant loss to sky (ventilated)
Zero off-set response:	ISO & WMO	±2 W/m ²	±4 W/m ²	<3 W/m ²	For 5°C/hr change in ambient temperature
Resolution	WMO	±1 W/m ²	±5 W/m ²	0.6W/m ²	Smallest detectable change
Non-stability:	ISO & WMO	±0.8%	±1.5%	<1.0%	Change in sensitivity per year
Non-linearity:	ISO & WMO	±0.5%	±1%	<1%	Deviation from sensitivity at 500 W/m ² over 100 to 1000 W/m ² range
Directional response:	ISO & WMO	±10 W/m ²	±20 W/m ²	±20 W/m ²	Error due to assuming that the normal incidence response at 1000 W/m ² is valid for all directions
Spectral selectivity	ISO (0.35–1.5 μm) WMO (0.30–3.0 μm)	±3% ±2%	±5% ±5%	±10% (0.4-2.7 μm)	Deviation of the mathematical product of spectral absorptance and transmittance from the mean
Temperature response:	ISO & WMO	±2%	±4%	±1%	Error due to 50°C ambient temperature change
Tilt response:	ISO & WMO	±0.5%	±2%	See note *	Deviation from horizontal responsivity due to tilt from horizontal to vertical at 1000 W/m ²
Achievable uncertainty:	WMO hourly totals WMO daily totals	3% 2%	8% 5%	5% ±10W/m ² 5%	95% confidence level

* Believed to be <2%, not yet clearly measured.

Gráfico do torque vs. Velocidade do motor de passos utilizado nesta dissertação [26]

Size 23 (12V 0.6A) (**RS** stock no. 440-458) using 3.5A bipolar chopper drive



Especificações Piranómetro SPN1 [31]

Specifications

The following accuracy figures give 95% confidence limits, i.e. 95% of individual readings will be within the stated limits under normal climatic conditions.

Overall accuracy: Total (Global) and Diffuse radiation	±5% Daily integrals ±5% ±10 W.m ⁻² Hourly averages ±8% ±10 W.m ⁻² Individual readings
Resolution	0.6 W.m ⁻² = 0.6 mV
Range	0 to >2000 W.m ⁻²
Analogue output sensitivity	1 mV = 1 W.m ⁻²
Analogue output range	0 – 2500 mV
Sunshine status threshold	120 W.m ⁻² in the direct beam

Other specifications

Accuracy: Sunshine status	±10% sun hours with respect to the threshold
Accuracy: Cosine correction	±2% of incoming radiation over 0-90° Zenith angle
Accuracy: Azimuth angle	± 5% over 360° rotation
Temperature coefficient	± 0.02% per °C typical
Temperature range	-20 to + 70°C
Stability	Recalibration recommended every 2 years
Response time	< 200 ms
Spectral response	400 - 2700 nm
Spectral sensitivity variation	10% typical
Non-linearity	< 1%
Tilt response	negligible
Zero offsets	< 3 W.m ⁻² for a change of 5°C/hr in ambient temperature < 3 W.m ⁻² dark reading
Latitude capability	-90° to + 90°
Environmental sealing	IP67
Sunshine status output	No sun = open circuit Sun = short circuit to ground
Power requirement	2 mA (excluding heater power), 5V – 15V DC
Heater power	12 V - 15 V DC, up to 1.5 A
Heater control	Continuously variable up to 20W output for external temperatures below 0°C
Lowest snow & ice-free temperatures (with heater in use)	-20°C at 0 m/s wind speed -10°C at 2 m/s wind speed
Mounting options	3 x M5 tapped holes in base at 108 mm dia, 120° spacing
Size & Weight	126 mm dia. x 94 mm high, 786g

Especificações Piranómetro MS-802 da Eko do seguidor solar [27]

	MS-802
ISO 9060 classification	Secondary Standard
Output	Analog (mV)
Response time 95%	< 5 Sec.
Zero Offset A 200W/m ²	< 0 W/m ²
Zero Offset B 5K/hr	+/- 2 W/m ²
Non-stability change/1 year	+/- 0.5 %
Non-linearity at 1000W/m ²	+/- 0.2 %
Directional response at 1000W/m ²	+/- 10 W/m ²
Spectral selectivity 0.35-1.5µm	+/- 1 %
Temperature response -10°C to 40°C	< 1 %
Temperature response -20°C to 50°C	< 2 %
Tilt response at 1000W/m ²	+/- 0.2 %
Sensitivity	Approx. 7 µV/W/m ²
Impedance	Approx. 500 Ω
Operating temperature range	-40 - 80 °C
Irradiance range	0 - 4000 W/m ²
Wavelength range	285 - 3000 nm
Ingress protection IP	67
Cable length	10 m

Especificações Pireliómetro MS-57 da Eko do seguidor solar [28]

	MS-57
ISO 9060 classification	First Class
Output	Analog (mV)
Response time 95%	< 0.2 Sec.
Zero Offset A 200W/m ²	0 W/m ²
Zero Offset B 5K/hr	< 1 W/m ²
Non-stability change/1 year	-
Non-stability change/3 years	< 0.5 %
Non-linearity at 1000W/m ²	< 0.2 %
Spectral selectivity 0.35-1.5µm	+/- 1 %
Temperature response -20°C to 50°C	< 0.5 %
Tilt response at 1000W/m ²	< 0.2 %
Sensitivity	Approx. 7 µV/W/m ²
Impedance	< 15000 Ω
Operating temperature range	-40 - 80 °C
Irradiance range	0 - 4000 W/m ²
Wavelength range	200 - 4000 nm
Ingress protection IP	67
Cable length	10 m